

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matej Paranos

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD
Projekt sustava za usporedbeno
umjeravanje mjerila tlaka do 2 MPa
koja koriste zrak kao radni medij

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Student:

Matej Paranos

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Lovorki Grgec Bermanec i Alenu Jurišincu na pomoći i savjetima prilikom izrade ovog rada.

Matej Paranos



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Matej Paranos**

Mat. br.: 0035188473

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Projekt sustava za usporedbeno umjeravanje mjerila tlaka do 2 MPa
koja koriste zrak kao radni medij**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**Design of pressure calibration system up to 2 MPa using air as
transmitting medium**

Opis zadatka:

Potrebno je projektirati mjerni sustav za sljedivo umjeravanje mjerila tlaka metodom usporedbe. Predvidjeti umjeravanje u režimu pretlak do 2 MPa koristeći zrak kao radni medij. U radu koristiti dijelove postojeće mjerne opreme Laboratorija za procesna mjerenja te opisati umjerne protokole s prijedlogom pripadajućih mjernih listova.

Potrebno je izraditi:

- Pregled normi i uputa za umjeravanje mjerila tlaka.
- Projektiranje i sastavljanje mjerne linije uz opis sheme spajanja.
- Proračun efektivnog tlaka na temelju rezultata umjeravanja tlačnom vagom.
- Primjere s rezultatima umjeravanja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	V
 1. UVOD.....	 1
1.1. Mjeriteljstvo	1
1.1.1. Mjerenje	1
1.1.2. Umjeravanje	1
1.1.1. Sljedivost.....	2
1.1.2. Mjerna nesigurnost.....	2
1.2. Mjerenje tlaka	4
1.2.1. Definicija tlaka.....	4
1.2.2. Metode mjerenja tlaka.....	5
 2. MJERILA TLAKA - TEORIJSKE OSNOVE	 7
2.1. Tlačne vage	7
2.1.1. Podjela tlačnih vaga	7
2.1.2. Princip rada tlačnih vaga.....	8
2.1.3. Sklop klip/cilindar.....	9
2.2. Pretvornici tlaka	10
2.2.1. Kapacitivni pretvornici	10
2.2.2. Promjenjivi linearni deformacijski pretvornici (LVDT).....	10
2.2.3. Peizorezistivni pretvornici	11
2.2.4. Pretvornici s vibrirajućim strukturama	11
 3. UMJERAVANJE MJERILA TLAKA	 12
3.1. Preduvjeti za postupak umjeravanja	12
3.1.1. Pogodan okoliš.....	12
3.1.2. Prikladan mjerni etalon	12
3.1.3. Spajanje etalona s ispitivanim uređajem.....	13
3.1.4. Metode generiranja i regulacije tlaka.....	13
3.1.5. Sustav za bilježenje rezultata mjerenja	13
3.1.6. Metode izračuna rezultata iz mjerenja	13
3.1.7. Unaprijed definiran postupak provedbe umjeravanja	13
3.1.8. Adekvatno obučeno osoblje.....	14
3.2. Metode umjeravanja mjerila tlaka.....	14
3.2.1. Priprema.....	14
3.2.2. Postupak umjeravanja	16
3.2.2.1. Opis Metode A	18
3.2.2.1. Opis Metode C	19

4. PROJEKTIRANJE MJERNOG SUSTAVA ZA SLJEDIVO UMJERAVANJE MJERILA TLAKA.....	21
4.1. Laboratorij za procesna mjerenja	21
4.2. Ispitivani pretvornik tlaka	21
4.3. Umjeravanje pretvornika tlaka s tlačnom vagom kao etalom.....	23
4.3.1. Podaci o umjeravanom mjerilu tlaka	23
4.3.2. Podaci o etalonu	24
4.3.3. Umjerna procedura.....	25
4.3.4. Uvjeti umjeravanja.....	25
4.3.5. Rezultati umjeravanja	25
4.4. Projektiranje i sastavljanje mjerne linije	27
4.5. Primjer umjeravanja mjerila tlaka s pretvornikom tlaka kao etalom	30
4.6. Podaci umjeravanja i prijedlog pripadajućih mjernih listova	33
5. REZULTATI MJERENJA	35
5.1. Proračun efektivnog tlaka na temelju rezultata umjeravanja tlačnom vagom kao etalom.....	35
5.2. Proračun mjerne nesigurnosti na temelju rezultata umjeravanja s pretvornikom tlaka kao etalom.....	39
5.2.1. Podaci dobiveni umjeravanjem.....	39
5.2.2. Identifikacija izvora mjernih nesigurnosti	39
5.2.3. Pojedine mjerne nesigurnosti	39
5.2.4. Složena standardna mjerna nesigurnost	41
5.2.5. Proširena mjerna nesigurnost	41
6. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	44
PRILOZI.....	45

POPIS SLIKA

Slika 1.	Odnos apsolutnih i manometarskih tlakova	5
Slika 2.	Vrste i područja primjene tlačnih vaga.....	7
Slika 3.	Sklop klip/cilindar	8
Slika 4.	Vizualizacija umjeravanja - Metoda A.....	16
Slika 5.	Vizualizacija umjeravanja - Metoda B	17
Slika 6.	Vizualizacija umjeravanja - Metoda C	17
Slika 7.	Vizualizacija umjeravanja - Slučaj dodatnog stezanja	17
Slika 8.	Vizualizacija umjeravanja - Detalj Z.....	18
Slika 9.	FLUKE 2700G pretvornik tlaka.....	21
Slika 10.	FLUKE P5510-2M Preša	22
Slika 11.	Shema mjerne linije.....	23
Slika 12.	Tlačna vaga „DHI“	24
Slika 13.	Dijagram mjerne nesigurnosti umjeravanog pretvornika tlaka	27
Slika 14.	Ispitivani opružni manometar.....	28
Slika 15.	Mjerna linija	29
Slika 16.	Shematski prikaz mjerne linije	29
Slika 17.	Shematski prikaz mjerne linije - etalon povezan s laptopom	30
Slika 18.	Proces umjeravanja u tijeku	31
Slika 19.	Pretvornik tlaka u radu	32
Slika 20.	Dijagram tlaka i mjerne nesigurnosti opružnog manometra	42

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mjerne serije - usporedba metoda	18
Tablica 2. Podaci o radnom etalonu	21
Tablica 3. Podaci o preši	23
Tablica 4. Podaci o umjeravanom mjerilu tlaka	24
Tablica 5. Podaci o etalonu	24
Tablica 6. Podaci o uvjetima umjeravanja	25
Tablica 7. Rezultati umjeravanja - prvi dio	25
Tablica 8. Rezultati umjeravanja - drugi dio	26
Tablica 9. Uvjeti umjeravanja opružnog manometra	30
Tablica 10. Primjer ispunjenog mjernog lista	34
Tablica 11. Podaci za etalon	37
Tablica 12. popis konstantnih veličina	37
Tablica 13. Popis utega	38
Tablica 14. Kombinacija utega i izračun efektnog tlaka	38
Tablica 15. Podaci dobiveni umjeravanjem	39
Tablica 16. Standardna mjerna nesigurnost etalona	40
Tablica 17. Standardna mjerna nesigurnost opružnog manometra	41
Tablica 18. Proširena mjerna nesigurnost opružnog manometra	42

POPIS OZNAKA

Oznaka:	Jedinica:	Opis:
p_e	Pa	efektivan tlak
F	N	ukupna normalna sila
A_e	m ²	efektivna površina
m_i	kg	prava masa i-tog utega
g	m/s ²	gravitacijsko ubrzanje sile teže za LPM
ρ_a	kg/m ³	gustoća zraka okoline
ρ_i	kg/m ³	gustoća i-tog utega
Γ	m	opseg kruga
c	N/m	površinska napetost ulja
A_0	m ²	efektivna površina za uvijete atmosferskog tlaka
λ	Pa ⁻¹	koeficijent elastične deformacije
p	Pa	nominalan tlak
α_k	Pa°C ⁻¹	koeficijent temperaturnog širenja klipa
α_c	°C ⁻¹	koeficijent temperaturnog širenja cilindra
t	°C	temperatura sklopa
ρ_f	kg/m ³	gustoća fluida (ulja)
h	m	razlika visine instrumenta i dna klipa
k	-	faktor prekrivanja
U_e	Pa	proširena mjerna nesigurnost etalona
u_e	Pa	standardna mjerna nesigurnost etalona
u_r	Pa	nesigurnost zbog rezolucije manometra
u_h	Pa	nesigurnost uslijed histereze
u_m	Pa	standardna mjerna nesigurnost manometra
U_m	Pa	proširena mjerna nesigurnost manometra

SAŽETAK

Osnovna zadaća ovoga rada bila je projektiranje mjerne linije za sljedivo umjeravanje mjerila tlaka do 2 MPa koja koriste zrak kao radni medij metodom usporedbe, opisivanje umjernih protokola, te izrada prijedloga pripadajućih mjernih listova.

U uvodnom poglavlju dan je teorijski osvrt na ključne pojmove ovoga rada: mjerenje, umjeravanje, sljedivost i mjernu nesigurnost, te osnove mjerenja tlaka. Sljedeće dvije cjeline također prate teorijski dio rada u kojima su detaljnije razrađena mjerila tlaka, te sam opis procesa umjeravanja.

Za potrebe izrade ovoga rada izvršeno je umjeravanje pretvornika tlaka s tlačnom vagom kao etalom, te je kasnije, taj pretvornik tlaka, korišten kao etalon za umjeravanje opružnog manometra. Napravljen je proračun efektivnog tlaka na temelju rezultata umjeravanja tlačnom vagom, te proračun mjerne nesigurnosti s rezultatima umjeravanja opružnog manometra.

Ukratko, u radu su opisani procesi umjeravanja različitim metodama, te su na razumljiv način razrađeni ključni problemi prilikom umjeravanja. Izrađeni su prijedlozi pripadajućih mjernih listova za buduća umjeravanja, kao i shematski prikaz mjerne linije, koji će se trebali koristiti u obrazovne svrhe studenata.

1. UVOD

Budući da se glavna tema ovoga rada bavi umjeravanjem mjerila tlaka, u uvodu su dana pojašnjenja nekih od osnovnih pojmova, krucijalnih za temu ovoga rada.

1.1. Mjeriteljstvo

Znano još i kao mjeroslovlje ili mjerologija, mjeriteljstvo je znanstvena metoda koja se bavi mjerenjem u svim njegovim teorijskim i praktičnim oblicima.

Mjeriteljstvo dijelimo na:

- temeljno mjeriteljstvo - obrađuje znanstvene postupke mjerenja
- tehničko mjeriteljstvo - obuhvaća postupke i načine mjerenja
- zakonsko mjeriteljstvo - obuhvaća primjere propisane zakonima

1.1.1. Mjerenje

Mjerenje je postupak određivanja vrijednosti neke mjerne veličine.

Dijeli se na:

- izravno mjerenje
- neizravno mjerenje.

Izravnim se mjerenjem neka mjerna veličina uspoređuje s istovrsnom usporedbenom veličinom, tkz. mjernom jedinicom. Neizravno, ili posredno, mjerenje obavlja se izravnim mjerenjem onih veličina od kojih je sastavljena mjerna veličina, te temeljem nekog znanstvenog načela, izračunom njezine vrijednosti.

1.1.2. Umjeravanje

Umjeravanje, poznato i kao kalibriranje ili baždarenje, predstavlja skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti mjernih veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima.

Etalon ili pramjera, može biti mjera, mjerilo, usporedbena tvar ili mjerni sustav koji su dogovorom, normom ili zakonom utvrđeni kao utjelovljenje neke mjerne jedinice ili određene vrijednosti neke fizikalne veličine.

Referentni etaloni su instrumenti koji imaju stabilnost u dugom periodu rada. Kod umjeravanja mjerila za mjerenje tlaka, kao primarni etalon za ispitivanje ostalih mjerila

najčešće koristimo tlačne vage, budući da su one najprecizniji instrumenti kada je u pitanju mjerenje tlaka, te ih kao takvima opravdano smatramo točnijima u odnosu na instrument koji umjeravamo.

Također, za umjeravanje mjerila tlakova mogu se koristiti i visokokvalitetni tekućinski manometri. No, njihova primjena u području visokih tlakova je ograničena zbog potrebne visine stupca tekućine.

Nakon umjeravanja, izrađuje se certifikat, tj. potvrda o umjeravanju, u kojem su prezentirane vrijednosti tlaka za etalon, vrijednosti za umjeravani instrument, te njihova međusobna odstupanja.

Nije potrebno umjeravanje svih instrumenata. Na primjer, kod uređaja za mjerenje koji služe samo kao indikatori postojanja tlaka, nije potrebna visoka točnost, pa stoga takve uređaje nije potrebno ni umjeravati. Ipak, većinu mjernih instrumenata potrebno je redovito umjeravati. Prosječno vremensko razdoblje između dva umjeravanja iznosi otprilike godinu dana, no po potrebi se može vršiti i češće.

1.1.3. Sljedivost

Mjerna je sljedivost svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referencijskim etalonima, obično državnim ili međudržavnim, neprekinutim lancem usporedaba koje imaju utvrđene nesigurnosti

1.1.4. Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu mjerenja koji označuje rasipanje vrijednosti što se smije razborito pripisati izmjerenoj vrijednosti.

Svaki izračun mjerne nesigurnosti sastoji se od sljedećih koraka:

- identifikacija izvora mjerne nesigurnosti
- procjena mjerne nesigurnosti za svaki izvor
- izračun kombinirane mjerne nesigurnosti za svaki izvor

Prilikom identifikacije mjerne nesigurnosti vodimo računa o svim segmentima koji utječu na mjerenje (Mjerni instrumenti, pomoćna oprema, metoda mjerenja, objekt mjerenja, nesigurnost samih mjerila, uvjeti okoliša i drugo).

Kada smo identificirali sve izvore mjerne nesigurnosti, postupak računanja mjerne nesigurnosti nastavljamo s procjenom mjerne nesigurnosti za svaki pojedini definirani izvor iz prethodnog koraka.

Nesigurnost procjenjujemo na dva načina:

- ako za neki podatak imamo više mjerenja, onda koristimo tkz. metodu A, pri čemu se standardna nesigurnost računa iz standardne devijacije podataka iz više mjerenja, drugim riječima statistički
- procjene koje se baziraju na drugim podacima (poput iskustva rada na istom tipu mjerila, podaci iz umjernica, specifikacije, izračuni i slično) kada nam je poznat interval vjerojatnosti da se prava vrijednost nalazi unutar intervala, pomoću tkz. metode B

Posljednji korak je izračun kombinirane mjerne nesigurnosti svih izvora. Prije samog računanja, podatke iz svih izvora svodimo na istu razinu pouzdanosti, tj. na standardnu nesigurnost (u), kako ne bi računali s nekompatibilnim vrijednostima.

Za podatke dobivene statističkom metodom A, standardna nesigurnost se računa iz standardne devijacije za sve podatke dobivene mjerenjem:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

Ovakav način obrade podataka je primjeren Gauss-ovoj ili normalnoj razdiobi, gdje su podaci grupirani oko srednje vrijednosti. Učestalost pojavljivanja neke vrijednosti pada s odmicanjem od srednje vrijednosti.

U slučaju da se nesigurnost računa metodom B, tada nam je poznat samo interval nesigurnosti u kojem se vjerojatno nalazi prava vrijednost. Takvu razdiobu nazivamo pravokutnom. Standardna devijacija za takav tip mjerenja računa se iz omjera polu-intervalu nesigurnosti (a) te korijena broja 3:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Prije računanja složene standardne mjerne nesigurnosti potrebno je sve sastavnice jednadžbe svesti na istu mjernu jedinicu. Složena standardna mjerna nesigurnost (u_c) računa se kao korijen iz sume kvadrata nesigurnosti svakog pojedinog izvora:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + \dots}$$

Proširena mjerna nesigurnost računa se kao produkt kombinirane mjerne nesigurnosti, te faktora prekrivanja (k) koji najčešće iznosi 2, te se ona pridružuje rezultatu mjerenja:

$$U = k \cdot u_c$$

1.2. Mjerenje tlaka

1.2.1. Definicija tlaka

Tlak je fizikalna veličina koja opisuje djelovanje sile na površinu. Definirana je kao normalna sila koja djeluje na jedinicu površine. Za ravnotežni fluid, tlak je definiran sljedećom jednadžbom:

$$p = \frac{dF}{dA}$$

Sila je vektorska veličina, pa tako ima svoju veličinu, kao i smjer. Općenito postoje tri nezavisne komponente tlaka, tj. naprezanja, koje djeluju na površinu. Kada se promatraju unutrašnje sile u krutom tijelu to može biti od važnosti pa su nam za opisivanje sile u materijalu općenito potrebni tenzori naprezanja. No, budući da se sva mjerila tlaka koriste za mjerenje tlaka u fluidu, a ne u krutim tijelima, tada tenzori naprezanja ne moraju biti korišteni.

U mehanici fluida tlak je specifična težina, w , prema visini, h :

$$dp = -w \cdot dh$$

Mjerna jedinica za tlak po Međunarodnom sustavu mjernih jedinica SI je Pascal (Pa). To je izvedena mjerna jedinica, koja se definira omjerom jednog Njutna (N) po metru kvadratnom:

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Kao i Pascal, i Njutn je izvedena mjerna jedinica, koja se pomoću osnovnih mjernih jedinica SI sustava definira kao:

$$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}$$

Dakle, prema osnovnim SI jedinicama, Pascal se definira kao omjer jednog kilograma po metru i sekundi na kvadrat:

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m s}^2}$$

Budući da je 1 Pa vrlo mala jedinica za tlak, definirane su neke druge mjerne jedinice. Iznimno dozvoljene jedinice za mjerenje tlaka izvan SI sustava, su bar i milimetri stupca žive (mmHg):

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmHg} \approx 133,322 \text{ Pa}$$

U fizici se često spominje i fizikalna atmosfera (Atm), koja je definirana kao:

$$1 \text{ Atm} = 101\,325 \text{ Pa}$$

U anglosaksonskom svijetu koriste se i mjerne jedinice Imperijalnog sustava mjera, tj. jedinice tkz. anglosaksonskog sustava mjera. Često korištene anglosaksonske mjerne jedinice za tlak su inči stupca žive (inHg), te funta po kvadratnom inču (psi):

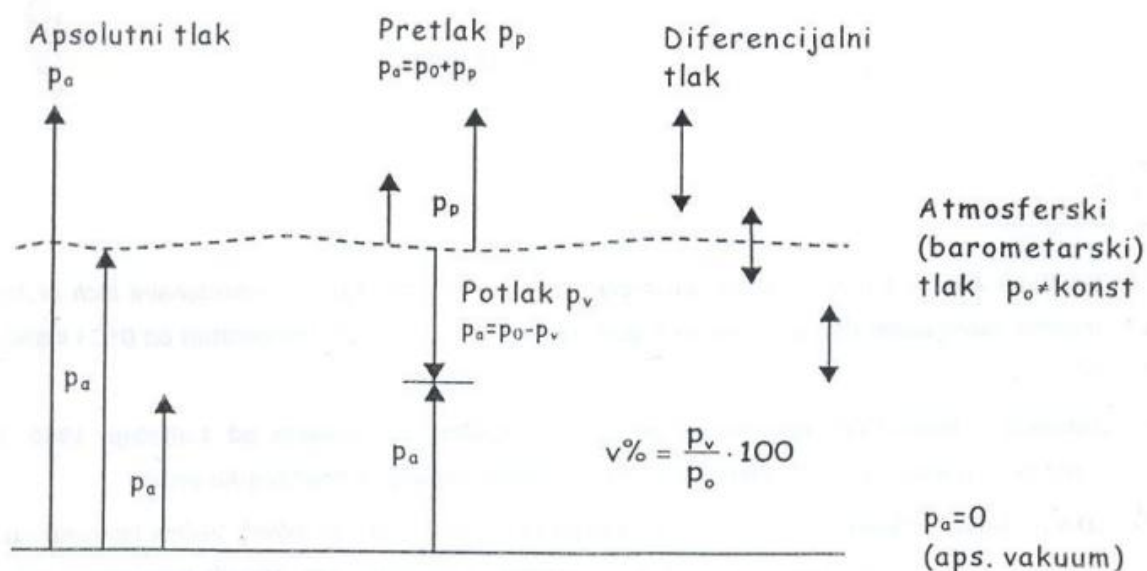
$$1 \text{ inHg} = 3386,39 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ psi} = 6894,76 \text{ Pa}$$

1.2.2. Metode mjerenja tlaka

Tlak je općenito, rezultat djelovanja molekula unutar fluida na stijenke posude. Kada neka posuda realnog volumena ne bi sadržavala niti jednu molekulu, tada bi tlak u njoj imao iznos nula, tj. govorili bismo o apsolutnom vakuumu (100% vakuum). Iako se danas postižu vrlo duboki vakuumi, stopostotni vakuum se ipak ne može niti teorijski postići.

Tlak mjeren na skali koja koristi apsolutnu nulu kao referentnu vrijednost zove se apsolutni tlak, i njega mjerimo barometrom. S druge strane, tlak koji koristi tlak okoline, tj. atmosferski tlak kao referentnu vrijednost, zove se pretlak. Za razliku od apsolutnog tlaka, koji poprima svojstvo veličine stanja, kada govorimo o pretlaku onda to ne možemo tvrditi jer on ovisi o tlaku okoliša. Ako je izmjereni tlak niži od tlaka okoliša, tada ga nazivamo podtlak, koji također nije veličina stanja jer ovisi o okolišnom tlaku. Odnos apsolutnih i manometarskih tlakova slikovito je prikazan slikom 1.



Slika 1: Odnos apsolutnih i manometarskih tlakova

Glavne metode mjerenja tlaka su:

- Djelovanje poznate sile na poznatu površinu
- Mjerene visine stupca tekućine poznate gustoće
- Mehanička deformacija osjetnog elementa
- Promjena fizikalnog svojstva

2. MJERILA TLAKA - TEORIJSKE OSNOVE

2.1. Tlačne vage

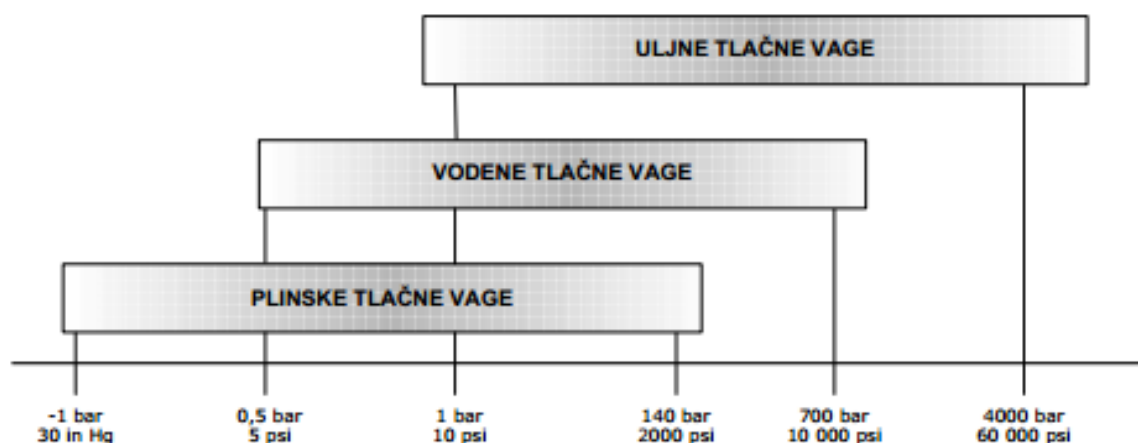
Tlačne vage pojavile su se prije otprilike 150 godina. U početku je bila riječ o raznim uređajima pomoću kojih se tlak generirao na principu djelovanja poznate sile na poznatu površinu. Razvoj tlačnih vaga potaknut je razvojem industrije. Kako je rasla industrijska primjena parnih strojeva, tako je rasla i potreba za što boljim razumijevanjem termodinamičkih svojstava plinova i tekućina pri različitim temperaturama i tlakovima.

2.1.1. Podjela tlačnih vaga

Tlačne vage dijele se, s obzirom na vrstu radne tvari s kojom rade, na:

- uljne tlačne vage
- vodene tlačne vage
- plinske tlačne vage

Ovisno o vrsti radne tvari koju koriste, tlačne vage mogu se primjenjivati u različitim radnim područjima tlakova, kako to slikovito prikazuje slika 2.



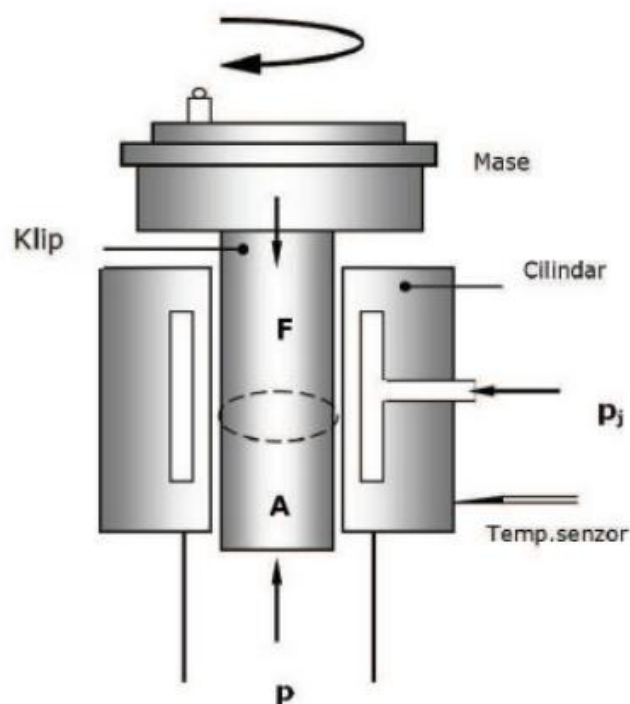
Slika 2: Vrste i područja primjene tlačnih vaga

Za rad u području viših tlakova koristimo uljne tlačne vage, dok za rad pri nižim tlakovima, te rad s tlakovima nižim od okolišnoga, koristimo plinske tlačne vage.

2.1.2. Princip rada tlačnih vaga

Princip rada tlačnih vaga temelji se na zakonu promjene hidrostatskog tlaka. Najvažniji dio svake tlačne vage je sklop klip/cilindar. Sklop se sastoji od precizno izrađenog okomitog klipa, izrađenog na mikronske tolerancije, koji je umetnut u blisko prilagođeni cilindar kako to prikazuje slika 3, oboje poznatih poprečno presječenih površina. Ta dva elementa određuju površinu koju nazivamo „efektna površina“. Utezi poznate mase se postavljaju na vrh slobodnog klipa kojega također smatramo djelom opterećenja. Na donji kraj klipa dovodi se fluid pod tlakom. Najčešće je riječ o dušiku ili bijelom ulju. Fluid se dovodi sve dok se ne razvije dovoljna sila koja će podići klip s utezima. Kada klip slobodno rotira u cilindru, tada je vaga u ravnoteži s nepoznatim tlakom u sustavu.

Kroz procijep između klipa i cilindra postoji istjecanje fluida iz sustava. U tom procijepu se stvara tanak film fluida koji omogućava neophodno podmazivanje između te dvije površine. Klip se rotira kako bi eliminirao trenje. Zbog ovog istjecanja fluida iz sustava, tlak u fluidu se mora moći održavati na jednakoj razini, kako bismo mogli klip s utezima održati u plutajućem stanju. To se često postiže upotrebom promjenjivog volumena koji funkcionira na principu Boyle-ovog zakona.



Slika 3: Sklop klip/cilindar

2.1.3. Sklop klip/cilindar

Kao što je ranije spomenuto, sklop klip/cilindar je glavni dio svake tlačne vage. Zbog toga se treba posebna pozornost posvetiti izradi upravo ovog djela tlačnih vaga. Glavni zahtjevi za izradu sklopova su:

- sklop mora biti izrađen od materijala koji može izdržati visoka dinamička tlačna opterećenja (obično se koriste materijali kao što su volfram, karbidi, čelici ili keramike)
- površine klipa i cilindra moraju biti izrađene u najfinijim strojarskim tolerancijama
- procijep između površina klipa i cilindra mora biti mali i konstantan (obično između $0,5\text{ }\mu\text{m}$ i $1\text{ }\mu\text{m}$)

Valja spomenuti da prilikom mjerenja moramo mjeriti i druge veličine, poput položaja klipa u sklopu i brzinu rotacije klipa, elastična svojstva klipa i cilindra, omjer pada klipa s promjenom tlaka i temperature, te druge, kako ne bi utjecali na točnost našeg mjerenja.

Danas prevladavaju tri osnovne konfiguracije sklopova klip/cilindar:

- jednostavna konfiguracija ($p_j=0$)
- uvučena konfiguracija ($p_j=p$)
- tlakom kontrolirani zazor ($p_j\neq 0$)

Jednostavna konfiguracija je najčešće korištena i najrasprostranjenija konfiguracija. Kod ove konfiguracije mjerni tlak djeluje samo na bazu klipa.

Kod uvučene konfiguracije, tlak djeluje na bazu klipa, ali i na oplošje cilindra. Konstrukcija im omogućuje da kompenziraju velike distorzije klipa i cilindra uslijed djelovanja visokog tlaka. Danas se rijetko koriste.

Za tlačne vage sa sklopom klip/cilindar konfiguracije tlakom kontroliranog zazora, tlak p_j je varijabilan te zasebno kontroliran i mjeren. Tim se tlakom kontrolira veličina zazora između klipa i cilindra čime se jednostavnije može definirati efektna površina.

2.2. Pretvornici tlaka

Pretvornici tlaka su instrumenti koji pretvaraju mjereni tlak u analogan električni signal koji je proporcionalan mjerenom tlaku. Spadaju pod skupinu elektromehaničkih manometara u koje ubrajamo i transmitere.

Ovisno o modelu izlazni signal pretvornika tlaka može biti:

- struja
- napon
- frekvencija

Kako bi se osigurala njihova funkcija, pretvornici tlaka trebaju imati neprekidno napajanje stabilizirano na razinu povezanu s očekivanom nesigurnošću tlaka.

Pretvornike tlaka dijelimo na:

- kapacitivne pretvornike
- promjenjive linearne diferencijalne pretvornike (LVDT)
- piezorezistivne pretvornike
- pretvornike s vibrirajućim strukturama.

2.2.1. Kapacitivni pretvornici

Koriste se u kombinaciji s dijafragmom koja tvori površinu na koju s jedne strane djeluje mjereni tlak, a s druge strani neki referentni tlak. Kako s jedne strane djeluje tlak koji je veći u odnosu na onaj drugi, tako se površina dijafragme deformira, te se posljedično, tako mijenja i kapacitet.

Kapacitivni su pretvornici među najčešće korištenim pretvornicima. Imaju široko mjerno područje tlakova od 10^{-3} Pa do 10^7 Pa. Imaju dobru ponovljivost, linearnost i visoku rezoluciju. Mogu biti većih gabarita od ostalih pretvornika, a i cijena im je također veća.

2.2.2. Promjenjivi linearni deformacijski pretvornici (LVDT)

Promjenjivi linearni diferencijalni pretvornici su induktivni uređaji koji rade na principu senzora položaja. Spojeni su preko dijafragme na mjereni tlak. Sastoje se od cilindra izrađenog od feromagnetnog materijala koji se nalazi unutar cijevi koja oko sebe ima tri namotane zavojnice. Kada se cilindar giba unutar cijevi tako se mijenja magnetsko polje. Promjena magnetskog polja može se registrirati pomoću elektronike. Registriraju se pomaci manji od milimetra, a koriste se za radno područje tlakova od 0.01 Pa do 10 MPa.

2.2.3. Piezorezistivni pretvornici

Piezorezistivni pretvornici su pretvornici osjetljivi na opterećenje su instrumenti kod kojih se mijenja električni otpor s obzirom na vlačno ili tlačno opterećenje. Kada su povezani s dijafragmom, mjere tlak pomoću promjene pomaka dijafragme. Ovakve uređaje redovito spajamo u Wheatstone-ov most.

Nazvani su po fenomenu promjene otpora uslijed sabijanja ili istežanja pomoći mehaničke sile, poznatog kao piezorezistivnost. Ovaj fenomen uočava se kod većine vodiča i poluvodiča. Kada se čelična žica izduži, tada postaje tanja i duža te se njezin otpor povećava s obzirom na geometriju i piezo otpornost.

Koriste se za mjerenje tlakova u rasponu od 1 kPa do 100 MPa.

2.2.4. Pretvornici s vibrirajućim strukturama

Kod pretvornika s vibrirajućim strukturama, struktura senzora se spaja na deformirajuće elemente poput dijafragme. Deformacijom dijafragme mijenja se napetost ili kompresibilnost vibrirajuće strukture, a posljedično i njezina frekvencija. Ovi instrumenti se mogu izraditi s oštrom rezonantnom frekvencijom a se svaka promjena u rezonanciji može lako registrirati i pretvoriti u tlak. Vibrirajuća struktura ne bi smjela biti u direktnom dodiru s radnim medijem zbog utjecaja eventualne vlage.

Uređaji se koriste na mjestima gdje cijena nije prioritet već sama veličina uređaja, te mogućnost povezivanja s digitalnim izlazom. Mjere tlakove u radnom području od nekoliko do nekoliko stotina MPa.

3. UMJERAVANJE MJERILA TLAKA

3.1. Preduvjeti za postupak umjeravanja

Da bi se uspješno provelo umjeravanje nekog mjerila tlaka, tj. kako bi se izvršila kalibracija nekog uređaja, trebali bi biti zadovoljeni sljedeći preduvjeti:

- pogodan okoliš
- prikladni mjerni etalon
- spajanje etalona na ispitivano mjerilo tlaka
- metode generiranja i regulacije tlaka
- sustav za bilježenje rezultata mjerenja
- metode izračuna rezultata iz mjerenja
- unaprijed definiran postupak provedbe umjeravanja
- adekvatno obučeno osoblje

3.1.1. Pogodan okoliš

Umjeravanja bi se trebala provoditi u laboratoriju sa stabilnim uvjetima. Preporučuje se da za vrijeme provođenja umjeravanja nema vibracija, da uređaji nisu postavljeni na površinu koja je pod nekim kutom u odnosu na horizontalu, te da nema većih promjena u temperaturi i vlažnosti tijekom umjeravanja. U nekim situacijama nije moguće imati „idealne uvjete“, tako da se umjeravanje može provesti i tada, primjerice kada imamo neke fluktuacije u temperaturi. No, ukoliko se umjeravanje provodi u relativno nestabilnim uvjetima, dovodimo u pitanje pouzdanost rezultata, a time i sami smisao provođenja postupka.

3.1.2. Prikladni mjerni etalon

Etalon koji ćemo koristiti prije svega ovisi o prirodi mjerenja mjernog instrumenta kojega umjeravamo. Ako nas ne zanimaju visoke razine točnosti, tada možemo koristiti praktički bilo koji etalon za kojeg vjerujemo da je pouzdan. No, ukoliko se naš mjerni uređaj koristi u situacijama gdje je potrebna visoka razina točnosti i velika preciznost rezultata, tada ćemo se koristiti onim etalonima koji predstavljaju nacionalne standarde po pitanju mjerne nesigurnosti i s kojima ćemo biti sigurni da će umjeravanje biti provedeno kvalitetno, te da ćemo imati kvalitetne podatke za naš umjeravani instrument.

3.1.3. Spajanje etalona s ispitivanim uređajem

Većina uređaja za mjerenje tlaka se umjerava tako da se pomoću cijevi poveže s etalonom tako da i ispitivani uređaj i etalon mjere jednaki tlak. No to nije uvijek slučaj. Neki uređaji moraju se dovesti u prostor u kojem vlada nekakav tlak kojega mjerimo etalonom kako bismo mogli usporediti rezultate mjerenja. Također, većina uređaja za mjerenje vakuuma ne može se spojiti s etalonom pomoću cijevi.

3.1.4. Metode generiranja i regulacije tlaka

Postoji više metoda za stvaranje određenog tlaka za ispitivanje. Kako bi odabrali najbolju metodu za generiranje tlaka, trebamo znati u kojem području tlakova trebamo raditi, tj. želimo li dobiti uvijete ispod, oko ili iznad razine atmosferskog tlaka, koja nam je vrsta radnog medija te kako ćemo kasnije regulirati razinu tlaka.

3.1.5. Sustav za bilježenje rezultata mjerenja

Za većinu umjeravanja, dovoljno je pratiti rezultate i zapisivati ih rukom. Ipak, u nekim slučajevima to nije dovoljno i najčešće moramo imati određenu razinu autonomnosti sustava koji će pratiti i bilježiti rezultate. Većina kvalitetnijih mjernih uređaja imaju u sebi priključke za spajanje na računalo, te se proces umjeravanja automatski prati i bilježi. Najvažnije od svega je da, prije same provedbe postupka umjeravanja, unaprijed znamo kako ćemo bilježiti rezultate.

3.1.6. Metode izračuna rezultata iz mjerenja

Važno je da se prilikom umjeravanja koristimo pravilne proračune za računanje nekih vrijednosti. Nerijetko se događa da imamo pogrešne pretpostavke o načinu prikupljanja podataka, ili se koristimo neadekvatnim aproksimacijama s mišljenjem da greška koju radimo nije značajna. Neadekvatan račun može uzrokovati nakupljanje grešaka, te će rezultati na kraju biti neprecizni.

3.1.7. Unaprijed definiran postupak provedbe umjeravanja

Iako nije realno očekivati da će uvijek sve ići onako kako je zamišljeno, trebamo voditi računa o tome da se držimo zadane procedure. Nažalost, zbog neispravnog vjerovanja da je uvijek dobro eliminirati sve rezultate koji se bitno razlikuju od ostalih, tj. znatno odskaku od predviđenih vrijednosti, često se događa da se mjerenja ponavljaju dok se ne dobiju „ljepši“ rezultati koji onda uljepšavaju statističke podatke, ili čak prikrivaju stvarne.

3.1.8. Adekvatno obučeno osoblje

Nije realno predlagati da se svi djelatnici koji vrše umjeravanja moraju vrhunski obučiti za provođenje postupka umjeravanja, budući da se mnogobrojna umjeravanja svakodnevno vrše u svim granama industrije. No ipak, pogrešna je pretpostavka da za provedbu umjeravanja nisu potrebna određena znanja i vještine. Prije svega, treba voditi računa o sigurnosti, budući da se radi prilikom umjeravanja mogu ostvariti vrlo visoki tlakovi.

3.2. Metode umjeravanja mjerila tlaka

Metode korištene u ovom radu opisane su u vodiču za umjeravanje mjerila tlaka pod imenom „DKD-R 6-1 Calibration of Pressure Gauges“.

3.2.1. Priprema

Prije svega, potrebno je upoznati se s načinom rada i mogućnostima ispitivanog uređaja, provjeriti tehničke karakteristike te provjeriti stanje u kojem se uređaji nalaze. To vrijedi i za etalon i za ispitivano mjerilo tlaka. Trebali bi izvršiti vanjsku, te funkcionalnu provjeru prije samog početka ispitivanja.

Primjeri vanjske provjere su:

- vizualna inspekcija mogućih oštećenja
- čistoća i kontaminiranost uređaja
- vizualna provjera čitljivosti i mogućih oznaka
- provjera tehničke dokumentacije

Primjeri funkcionalne provjere:

- provjera curenja radnog medija duž mjerne linije
- električna pouzdanost
- ispravno funkcioniranje kontrolnih elemenata
- podešavanje elemenata u definirane položaje
- ovisnost o momentu tijekom montiranja

Također, mora se voditi računa o uvjetima okoline. Najvažniji parametar je temperatura. Potrebno je uspostaviti temperaturnu ujednačenost između etalona i ispitivanog mjerila tlaka. Poželjno je da temperatura okoline bude u odgovarajućem temperaturnom rasponu (od 18°C do 28°C). Mora se uzeti u obzir i vrijeme zagrijavanja uređaja korištenih u ispitivanju, budući da se radio o uređajima koji koriste električnu energiju.

Kada se uspostavi ujednačena temperatura ispitivanje može krenuti. Promjena temperature tijekom samog procesa umjeravanja ne bi smjela varirati više od ± 1 K. Ako dođe do veće temperaturne promjene, temperatura i dalje mora biti u ranije navedenom rasponu temperatura, te se mora zabilježiti.

Za provođenje procesa, osim temperaturnog kriterija, potrebno je ispunjavanje i sljedećih uvjeta:

- ako je moguće, ispitivano mjerilo tlaka se mora umjeriti kao cjelina (cijela mjerna linija)
- mora se uzeti u obzir položaj mjerila tlaka prilikom umjeravanja
- umjeravanje se vrši preko jednako raspoređenih mjernih točaka u zadanom rasponu tlakova
- ovisno o preciznosti željene nesigurnosti, potrebno je provesti jedno ili više mjerenja
- ukoliko ovisnost ispitivanog mjerila tlaka o momentu prilikom montiranja nije dovoljno dobro poznata, dodatnim stezanjem se mora osigurati ponovljivost ispitivanja, a vrijednost momenta se mora ubilježiti
- visinska razlika između etalona i ispitivanog mjerila tlaka mora biti što je manja moguća, a ukoliko je značajna mora se uračunati

Potrebno je voditi računa o mjernim područjima etalona i umjeravanog mjerila tlaka, tj. o rasponima tlakova koje mogu očitavati. Zbog toga se mjerne točke u kojima se vrši ispitivanje određuju na dva načina:

- prema značajkama ispitivanog mjerila tlaka
- prema značajkama etalona

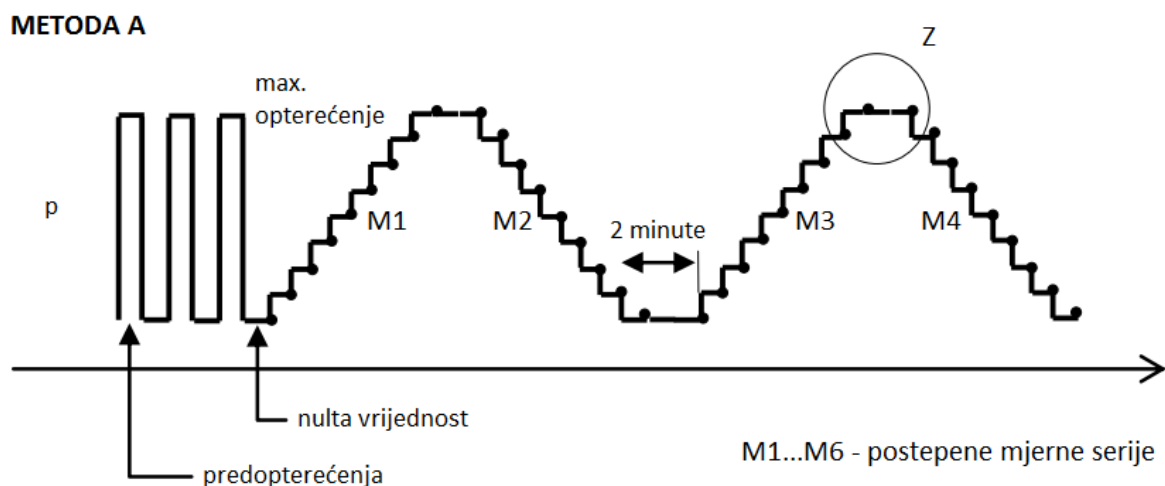
3.2.2. Postupak umjeravanja

Vrijeme potrebno da se uravnoteži talk najvećeg iznosa, kao i vrijeme između provedbe dva predopterećenja iznosi najmanje 30 sekundi. Kada se predopterećenje završi, potrebno je dovesti uređaje na nulu, tj. na razinu atmosferskog tlaka. Također, vrijeme potrebno za prelazak između dvije susjedne mjerne točke ne bi smjelo biti manje od 30 sekundi. Pogotovo to vrijedi za slučaj umjeravanja Bourdonovog manometra, po kojemu se mora i lagano „kuckati“ kako bi se minimizirao utjecaj sila trenja koja se javljaju kod kazaljke koja pokazuje tlak.

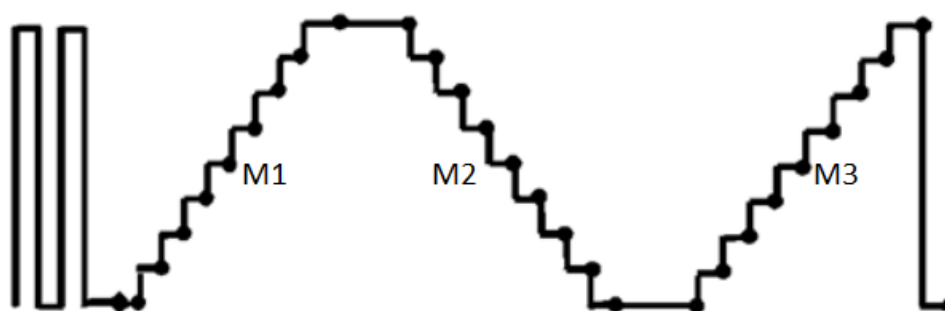
Ovisno o tome, koliko kvalitetno umjeravanje želimo, razlikujemo tri različita modela umjeravanja prema DKD-R-u:

- Metoda A
- Metoda B
- Metoda C

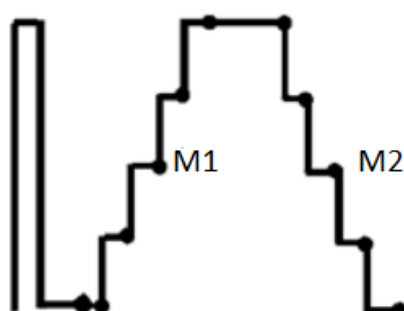
Razlike između metoda su u broju predopterećenja napravljenih prije početka postepenog dizanja i spuštanja tlaka, te minimalnom broju mjernih točaka. Metoda A je najzahtjevnija, te daje najkvalitetnije rezultate, dok je Metoda C najjednostavnija za provedbu, no rezultati dobiveni tom metodom su sukladno tome i najmanje pouzdani.



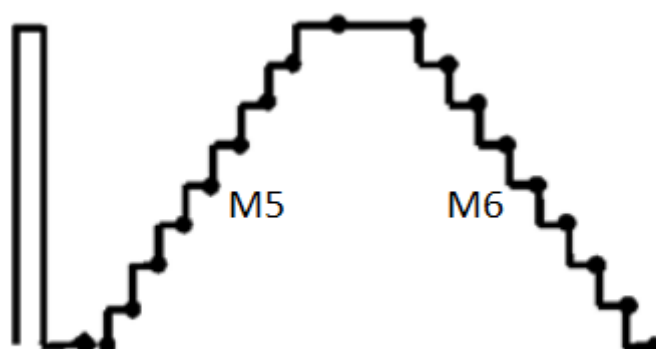
Slika 4: Vizualizacija umjeravanja - Metoda A

METODA B

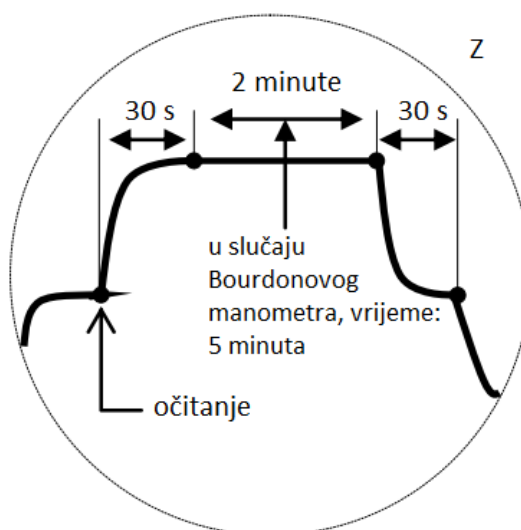
Slika 5: Vizualizacija umjeravanja - Metoda B

METODA C

Slika 6: Vizualizacija umjeravanja - Metoda C



Slika 7: Vizualizacija umjeravanja - Slučaj dodatnog stezanja



Slika 8: Vizualizacija umjeravanja - Detalj Z

Tablica 1. Mjerne serije - usporedba modela

Metoda	Razred (klasa) točnosti	Minimalni broj mjernih točaka s nulom ulaz/silaz	Broj predopterećenja	Promjena opterećenja + stacionarno vrijeme (sekunde)	Vrijeme zastoja u konačnoj vrijednosti mjernog područja (minute)	Broj mjernih serija	
						uzlazno	silazno
A	< 0.1	9	3	> 30	2	2	2
B	0.1...0.6	9	2	> 30	2	2	1
C	> 0.6	5	1	> 30	2	1	1

3.2.2.1. Opis Metode A

Metoda A je korištena kod umjeravanja pretvornika tlaka za potrebe izrade ovoga rada, stoga će se ukratko opisati.

Već je ranije spomenuto, da je metoda A najzahtjevnija od sve tri metode, ali upravo zbog toga daje i najtočnije rezultate. Glavni cilj ove metode je utvrditi sistemsku grešku i ponovljivost ispitivanog mjerila tlaka. Pripremni dio, prije samog početka ispitivanja je gotovo isti za sve slučajeve i već je opisan ranije. Stoga će se opisati samo postupak.

Nakon što se posložila mjerna linija, a etalonski i ispitivani uređaj mjere okolišni tlak, tkz. „nultu vrijednost“, kreće se s postupkom umjeravanja. Prvo se tri puta radi predopterećenje sustava, tako da se nametne maksimalni tlak s kojim će se raditi umjeravanje, pa se, poštujući vremenske odrednice spomenute ranije, tlak vrati na „nultu vrijednost“. Zatim se postupak ponovi još dva puta. Potom se kreće s prvom mjernom serijom, tj. s postepenim podizanjem tlaka od jedne zadane mjerne točke do druge. Za svaku točku se očitaju vrijednosti mjerenja i spremaju podaci za daljnju analizu. Kako to prikazuje slika 4. vidljivo je da imamo 4 mjerne serije. Prva mjerna serija je uzlazna, s postepenim podizanjem tlaka do gornjeg limita, koji ujedno predstavlja i tlak s kojim smo predopteretili sustav. Potom čekamo minimalno dvije minute kako je to prikazano na Detalju Z sa slike 8., osim u slučaju umjeravanja Bourdonovog manometra kada je vrijeme čekanja i dulje, te iznosi minimalno pet minuta. Nakon toga slijedi silazna serija postepenog spuštanja tlaka od jedne mjerne točke do druge, sve do „nulte vrijednosti“, te se nakon dvije minute postupak ponavlja. Ukoliko smo zbog momenta morali dodatno stegnuti mjernu liniju, tada radimo i treću ciklus od dvije mjerne serije, kako je prikazano na slici 7.

Rezultati umjeravanja metodom A daju nam za svaku točku mjerenja:

- tlak etalona
- ulazne i silazne vrijednosti mjerila
- srednju vrijednost
- odstupanje
- ponovljivost
- histerezu
- nesigurnost umjeravanja

Na potvrdu o umjeravanju nalaze se i ostali bitni podaci za umjeravanje poput podataka o etalonu i mjerenju, proceduri i slično.

3.2.2.2. Opis Metode C

Metoda C je korištena kod umjeravanja opružnog manometra za potrebe izrade ovoga rada, a koristit će se prilikom edukacije studenata s istim pretvornikom tlaka koji je umjeren za potrebe ovoga rada. Stoga će se kratko opisati postupak provedbe metode C.

Budući da je, kako je i ranije spomenuto, metoda C najjednostavnija od navedenih metoda, rezultati umjeravanja ovom metodom će imati relativno visok postotak nesigurnosti u odnosu

na preostale dvije metode, pogotovo metodu A. Ukoliko se za traži provedba umjeravanja ovom metodom, tada možemo pretpostaviti da nije potrebna visoka točnost rezultata, te ne moramo koristiti tlačne vage kao etalon, nego možemo uzeti i primjerice pretvornik tlaka za koji pretpostavljamo da je dovoljno pouzdan za naše potrebe.

Pripremni dio je isti kao i za ostale metode. Prvo radimo postavljanje predopterećenja, dizanjem tlaka na maksimalan tlak mjerenja, tj. gornji limit mjernog raspona. Nakon toga, vraćamo stanje na „nultu vrijednost“, te započinjemo s postepenim podizanjem tlaka u uzlaznoj seriji. Za razliku od metode A, a i metode B, koja nije detaljnije obrađena, za metodu C nam je potrebno manje mjernih točaka, te bi za isti ukupan raspon tlakova imali veće razlike vrijednosti tlaka između pojedinih mjernih točaka, tj. veće „skokove“ od jedne mjerne točke do druge. Nakon čekanja od dvije minute započinjemo silaznu seriju i dolaskom na atmosferski tlak umjeravanje završava.

Također, bilježimo vrijednosti tlakova za određene mjerne točke etalona i umjeravanog mjerila tlaka, te možemo izračunati mjernu nesigurnost umjeravanog mjerila tlaka u odnosu za etalon. U slučaju da imamo podatke o mjernoj nesigurnosti za korišteni etalon, možemo ih iskoristiti u računu za mjernu nesigurnost promatranog mjerila tlaka i tako dobiti točnije rezultate umjeravanja.

4. PROJEKTIRANJE MJERNOG SUSTAVA ZA SLJEDIVO UMJERAVANJE MJERILA TLAKA

4.1. Laboratorij za procesna mjerenja

Za potrebe izrade ovoga rada, napravljeno je nekoliko umjeravanja. Sva umjeravanja rađena su u Laboratoriju za procesna mjerenja, Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Sva oprema korištena prilikom ispitivanja, također pripada Laboratoriju za procesna mjerenja.

4.2. Ispitivani pretvornik tlaka

Glavna tema ovoga rada je projektiranje mjernog sustava za sljedivo umjeravanje mjerila tlaka do 2 MPa koja koriste zrak kao radni medij, i upravo je ovo ispitivano mjerilo tlaka zapravo radni etalon, koje će nam služiti kao etalon pri izvođenju ispitivanja. Riječ je o pretvorniku tlaka marke FLUKE, čije je radno područje od 0 do 2 MPa. Rezultati mjerenja se prikazuju na digitalnom zaslonu u jednoj od 21 ponuđenih mjernih jedinica koje se koriste. Postoji mogućnost povezivanja s računalom preko USB konektora.

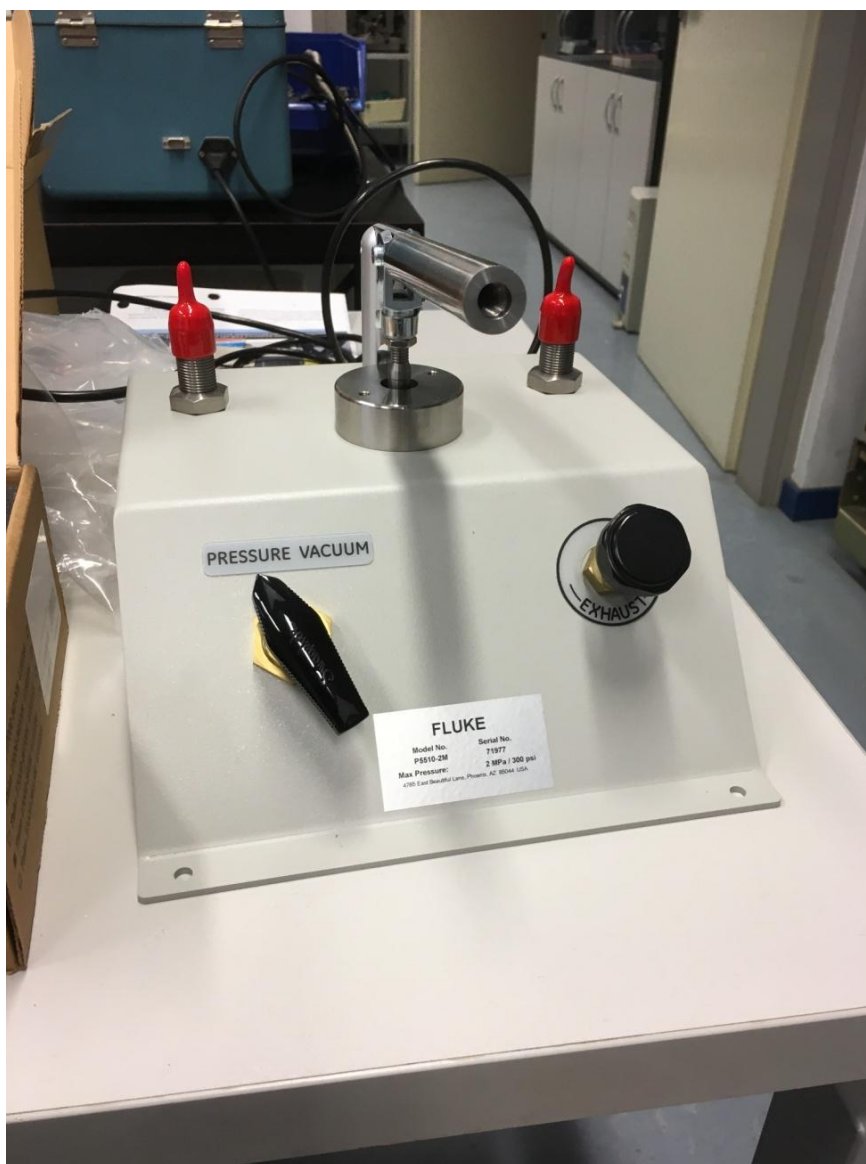


Slika 9: FLUKE 2700G pretvornik tlaka

Tablica 2. Podaci o radnom etalonu

Proizvođač	FLUKE
Model	2700G
Radni medij	zrak
Radno područje	od 0 do 2 MPa

Ispitivani pretvornik tlaka je kompatibilan sa serijom P5510 prešom za umjeravanje, koje također proizvodi FLUKE. Riječ je o preši koja služi za generiranje i regulaciju ispitivanog tlaka, kako bi mogli provesti umjeravanje. Tlak se generira s ručnom pumpom. Osim pretlaka, preša može stvarati podtlak, odnosno vakuum.



Slika 10: FLUKE P5510-2M Preša

Osim ručne pumpe, koja prvenstveno služi za nametanje nekakvog ispitivanog tlačnog opterećenja, preša ima i ventil za finu regulaciju ispitivanog tlaka. Regulacija pomoću ventila se vrši tako da se „pomalo“ ispušta zrak iz sustava kako bi se smanjilo tlačno opterećenje. Zbog toga je moguća fina regulacija tlaka samo u smjeru spuštanja tlačnog opterećenja, dok je za podizanje tlaka potrebno koristiti ručnu pumpu.

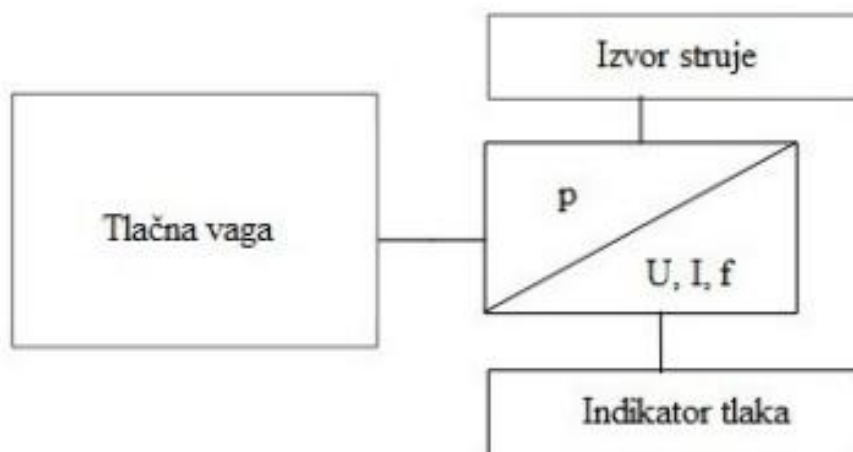
Tablica 3. Podaci o preši

Proizvođač	FLUKE
Model	P5510-2M
Radno područje (pretlak)	od 0 do 2 MPa
Radno područje (vakuum)	915 mbar (90% vakuum)
Dimenzije (mm)	240×330×180
Masa (kg)	3,5

Ima dva utora za priključak mjerila tlaka. Na jedan se spaja etalonsko mjerilo, a na drugi umjeravano mjerilo tlaka. Tako spojeni sustav s dva mjerila tlaka tvori mjernu liniju.

4.3. Umjeravanje pretvornika tlaka s tlačnom vagom kao etalomom

Kako bi se provjerila pouzdanost i preciznost pretvornika tlaka, za potrebe ovoga rada napravljeno je umjeravanje pretvornika tlaka s tlačnom vagom kao etalomom. Mjerenje je provedeno u Laboratoriju za procesna mjerenja, po metodi A.



Slika 11: Shema mjerne linije

4.3.1. Podaci o umjeravanom mjerilu tlaka

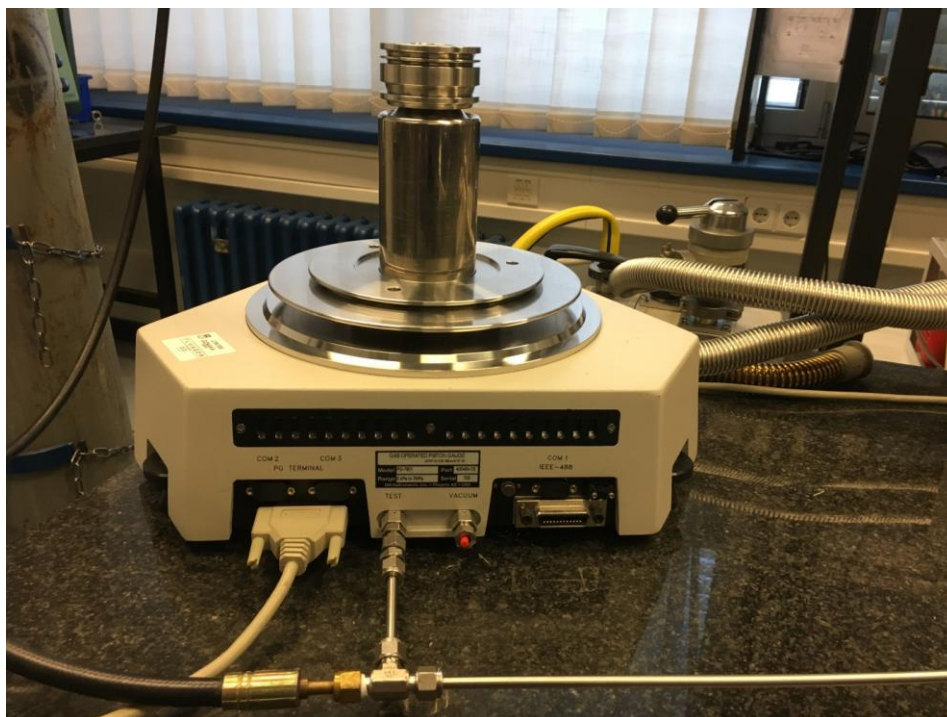
Kako je ranije spomenuto, umjeravao se FLUKE 2700G pretvornik tlaka. Već su ranije njegove karakteristike, a u potvrdi su navedeni podaci iz tablice 4.

Tablica 4. Podaci o umjeravanom mjerilu tlaka

Vrsta mjerila	Pretvornik tlaka
Mjerno područje	od 0 do 20 bar
Razred točnosti	0.020 %
Dopušteno odstupanje	0.004 bar
Podjela skale	0.001 bar
Jedinica tlaka	bar

4.3.2. Podaci o etalonu

Kao etalon korištena je tlačna vaga „DHI“ Laboratorija za procesna mjerenja.



Slika 12: Tlačna vaga „DHI“

Tablica 5. Podaci o etalonu

Naziv etalona	Tlačna vaga „DHI“
Interna oznaka	TLVAG-09
Nesigurnost etalona	$0.5 \times 10^{-4} \times p$
Sljedivost	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

4.3.3. Umjerna procedura

Instrument je umjeren pomoću etalonskih mjernih sustava Laboratorija za procesna mjerenja. Korištena je interna procedura umjeravanja metodom usporedbe CPLT-02 temeljena na DKD-R6 (Tip A) proceduri.

4.3.4. Uvjeti umjeravanja

Budući da su mjerenja rađena u laboratoriju, poštovane su preporuke dane za uvijete okoline.

Tablica 6. Podaci o uvjetima umjeravanja

Temperatura okoline	(24±1) °C
Tlak okoline	(2017±1) mbar
Relativna vlažnost okoline	(30±3) %rv
Tlačni medij	dušik
Pozicija ispitivanog mjerila	horizontalna

4.3.5. Rezultati umjeravanja

Tablica 7. Rezultati umjeravanja - prvi dio

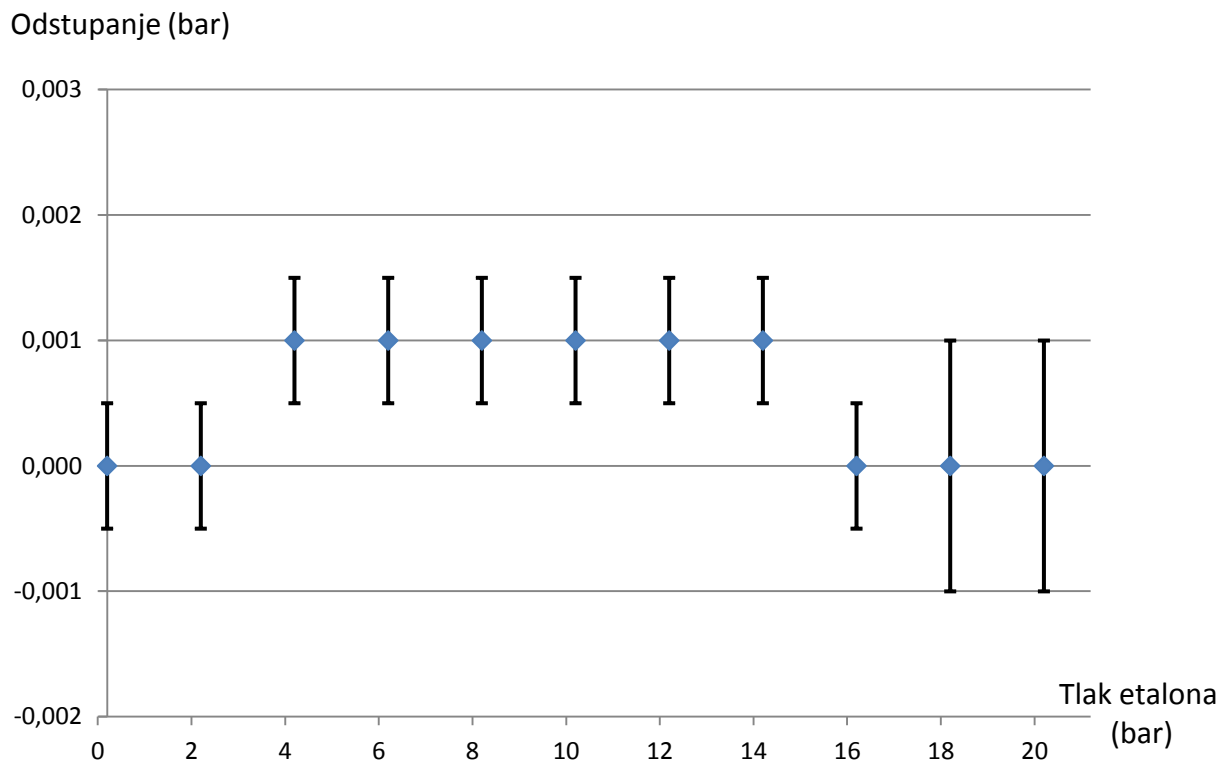
Broj ispitnih točaka	Tlak etalona p_e bar	Pokazivanje mjerila			
		Uzlazno bar	Silazno bar	Uzlazno bar	Silazno bar
1	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
2	2.000	1.999	2.000	2.000	2.000
3	4.000	4.000	4.001	4.000	4.001
4	6.000	6.001	6.001	6.000	6.001
5	8.001	8.001	8.002	8.001	8.002
6	10.001	10.001	10.002	10.001	10.002
7	12.001	12.002	12.002	12.001	12.002
8	14.001	14.002	14.002	14.001	14.001
9	16.001	16.001	16.002	16.001	16.001
10	18.001	18.001	18.002	18.001	18.001
11	20.002	20.002	20.002	20.001	20.001

Tablica 8. Rezultati umjeravanja - drugi dio

Broj ispitnih točaka	Srednja vrijednost M bar	Odstupanje $M-p_e$ bar	Ponovljivost b bar	Histereza h bar	Nesigurnost umjeravanja U bar
1	0.0003	0.000	0.001	0.001	0.001
2	1.9998	0.000	0.001	0.000	0.001
3	4.0005	0.001	0.000	0.001	0.001
4	6.0008	0.001	0.001	0.001	0.001
5	8.0015	0.001	0.000	0.001	0.001
6	10.0015	0.001	0.000	0.001	0.001
7	12.0018	0.001	0.001	0.001	0.001
8	14.0015	0.001	0.001	0.000	0.001
9	16.0013	0.000	0.001	0.000	0.001
10	18.0013	0.000	0.001	0.000	0.002
11	20.0015	0.000	0.001	0.000	0.002

Nesigurnost navedena u tablici je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju ($k=2$), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95%.

Mjerna nesigurnost umjeravanog pretvornika tlaka slikovito je prikazana za svaku ispitanu točku dijagramom na slici 13.



Sila 13: Dijagram mjerne nesigurnosti umjeravanog pretvornika tlaka

4.4. Projektiranje i sastavljanje mjerne linije

Rezultati umjeravanja pretvornika tlaka pokazali su da je naš instrument pouzdan i da ga možemo koristiti kao etalon u daljnjim ispitivanjima drugih mjerila tlaka. Posebno se to odnosi na umjeravanja manometara s kazaljkom i mjernom skalom čija rezolucija niti ne može primijetiti mjerne nesigurnosti pretvornike tlaka. Jedan takav manometar korišten je u primjeru umjeravanja napravljenom za potrebe izrade ovog rada.

Dakle, pretvornik tlaka FLUKE 2700G kojega smo umjerali s provjerenom tlačnom vagom Laboratorija za procesna mjerenja, ovdje koristimo kao etalon. Sve specifikacije su ostale iste jer ništa se vezano za sami instrument nije promijenilo, već jedino njegova uloga. On je sada jedan od dva mjerna instrumenta kojemu „više vjerujemo“ i pomoću njega ćemo umjeravati „ono drugo“, ispitivano mjerilo tlaka.

Kako je ranije spomenuto, ovaj pretvornik je kompatibilan sa P5510 prešom za umjeravanje. Prešu nismo koristi u prethodnom umjeravanju, ali u ovom slučaju ona je sastavni dio mjerne linije. Služit će nam prvenstveno za povezivanje etalona i ispitivanog mjerila tlaka, te generiranje tlačnog opterećenja.

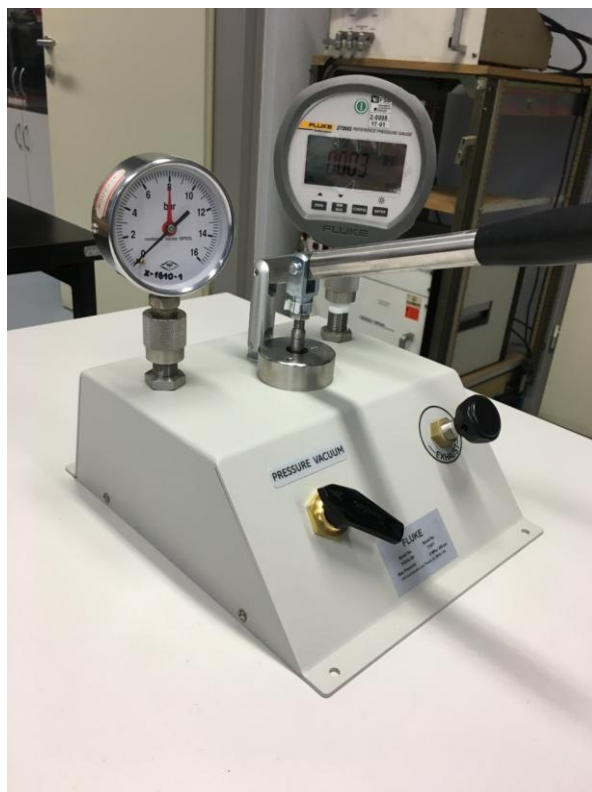
Budući da je preša, element mjerne linije s najvećom mason, ona se postavlja na radnu površinu, a instrumenti za mjerenje tlaka se priključe na dva otvora s gornje strane. Vrlo je jednostavna i praktična za korištenje. Može raditi u dva područja, području pretlaka i području vakuuma. Budući da će se raditi ispitivanja s tlakovima višim od atmosferskog koristit ćemo radno područje pretlaka. Potrebno je namjestiti postavke na preši za rad u pretlaku prije početka umjeravanja.

Kao ispitivano mjerilo tlaka možemo koristiti bilo koji instrument. U primjeru rađenom za potrebe izrade ovoga rada korišten je jedan stariji opružni manometar talijanskog proizvođača MAGNI. Manometar je dio mjerne opreme Laboratorija za procesna mjerenja. Njegovo radno područje je u rasponu od 0 do 16 bar.

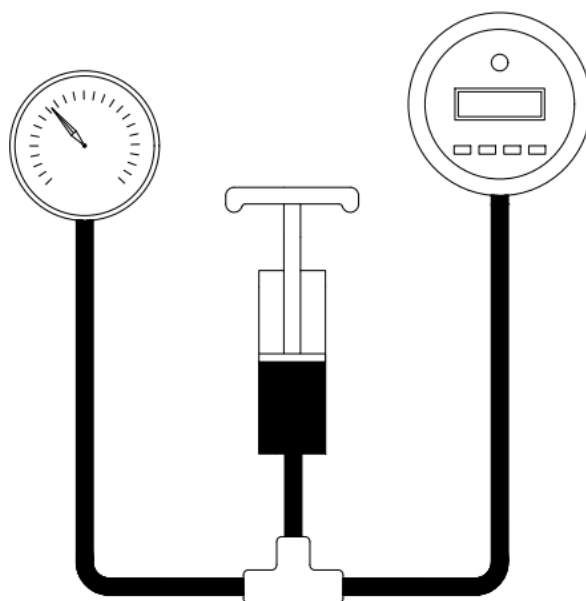


Slika 14: Ispitivani opružni manometar

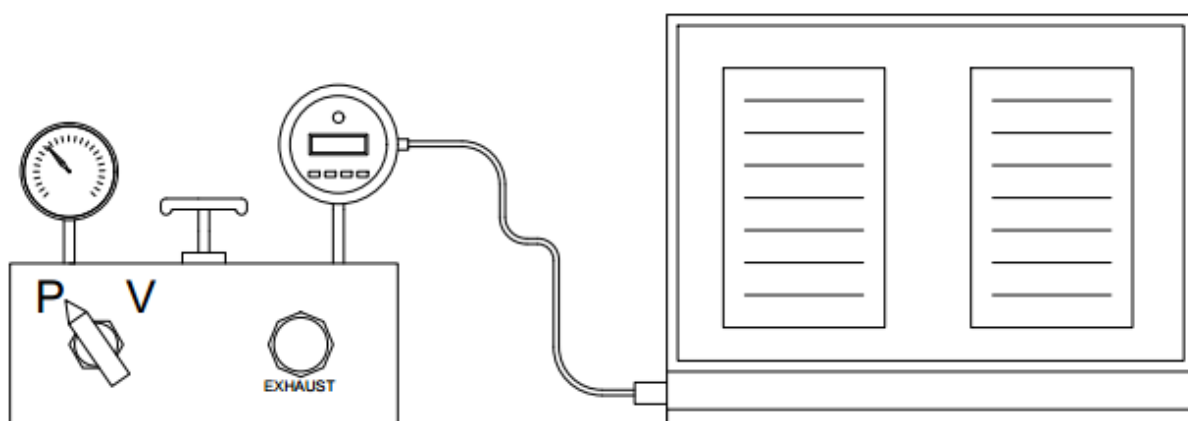
Kako je već ranije spomenuto, mjerila tlaka spajamo na prešu i tako tvorimo mjernu liniju, kako je prikazano na slici 15, te shematski prikazano na slikama 16 i 17.



Slika 15: Mjerna linija



Slika 16: Shematski prikaz mjerne linije



Slika 17: Shematski prikaz mjerne linije - etalon povezan s laptopom

4.5. Primjer umjeravanja mjerila tlaka s pretvornikom tlaka kao etalomom

Umjeravanje opružnog manometra s pretvornikom tlaka kao etalomom, provedeno je po metodi C opisanoj u DKD-R 6-1 vodiču za umjeravanje mjerila tlaka. Naravno, umjeravanje je provedeno u Laboratoriju za procesna mjerenja. Potrebno je ispunjavanje svih ranije spomenutih preduvjeta da bi se moglo provesti umjeravanje.

Uvjeti umjeravanja koji su vladali u laboratoriju za vrijeme umjeravanja opružnog manometra prikazani su u tablici 9.

Tablica 9. Uvjeti umjeravanja opružnog manometra

Temperatura okoline	$(26 \pm 1) ^\circ\text{C}$
Tlak okoline	$(2016 \pm 1) \text{ mbar}$
Relativna vlažnost okoline	$(15 \pm 3) \% \text{Rh}$
Tlačni medij	zrak
Pozicija ispitivanog mjerila	horizontalna

Nakon što je mjerna linija pripremljena, može se započeti s postupkom umjeravanja. Tlak se generira pomoću ručne pumpe na preši. Umjeravanje je vršeno po metodi C koja je već ranije detaljnije opisana. Nakon zadavanja predopterećenja, i povratka na vrijednosti atmosferskog tlaka krećemo s prvom uzlaznom serijom. Budući da opružni manometar može raditi u radnom području od 0 do 16 bar, a prema propisima metode C, moramo imati minimalno 5

mjernih točaka, odabrane su točke s nominalnim tlakovima od 0, 4, 8, 12 i 16 bar. Nakon što bi se izmjerile vrijednosti za neku mjernu točku, primjerice točku 3, nazivnog tlaka 8 bar, ručnom bi se pumpom generiralo povećanje tlaka radnog medija. Budući da ručne pumpe nisu odveć precizne povećanje tlaka se ne može precizno regulirati. Naime, da bi došli do iduće mjerne točke, točke 4, potrebno je generirati tlak od minimalno 12 bar. Pošto je to gotovo nemoguće napraviti prilikom rada s ručnom pumpom, pa čak ni najiskusnijim operaterima, obično se generira tlak nešto iznad 12 bar, pa se pomoću ispušnog ventila tlak spusti na vrijednost od 12 bar. Naravno, potrebno je pokušati biti što precizniji prilikom generiranja povećanja tlaka kako se ne bi otišlo „predaleko“ od zadane vrijednosti tlaka.

Poštivajući zadana stacionarna vremena izmjerene su vrijednosti za sve točke iz prve, uzlazne serije. Nakon uzlazne, slijedi silazna serija. I dok smo kod uzlazne serije bili prisiljeni, zbog samog sustava rada preše, generirati tlakove iznad neke mjerne točke, pa ih zatim spuštali, kod silazne serije takvu slobodu nemamo. Naime, budući da se tlak može spustiti samo otvaranjem regulacijskog ventila (s desne strane preše na slikama), onda smo osuđeni na korištenje isključivo tog regulacijskog ventila. Regulacijski ventil je dosta kvalitetno podešen tako da je moguća vrlo dobra regulacija spuštanja tlaka od jedne mjerne točke do druge. kako je riječ o ručnom ventilu, rad je podložan ljudskoj grešci. Zato prilikom rada u silaznoj seriji moramo biti posebno oprezni kako nam se tlak ne bi „prebrzo“ spustio ispod zadane razine mjerne točke, te ugrozio kvalitetu našeg mjerenja. Ako bi se to desilo, novo generiranje tlaka nije dopušteno budući da se tako ozbiljno narušava kvaliteta mjerenja.



Slika 18: Proces umjeravanja u tijeku

Rezultate za svaku radnu mjernu točku očitavamo s ispitivanog mjerila tlaka, te etalonskog mjerila tlaka. Kod ispitivanog opružnog mjerila tlaka korištenog u ovom umjeravanju potrebno je voditi računa o silama trenja koja se javljaju u mehanizmu. To je čest slučaj kod ovakvog tipa mjerila i rješava se jednostavno, tako da se svakih desetak ili više desetaka sekundi lagano „tucne“ po manometru kako bi se moglo očitati stvarno stanje. Naravno, ne treba ni spominjati da se mora lagano djelovati rukom na instrument, tek toliko da ga se protrese, jer u slučaju djelovanja jačom silom može doći i do oštećenja, čime ne samo da propada proces umjeravanja nego su dovedeni u pitanje i razmjeri štete mjernog instrumenta.

Prilikom očitavanja vrijednosti tlaka s opružnog manometra potrebno je jednostavno vidjeti položaj kazaljke u odnosu na grafički prikaz skale. Skala manometra bila je podijeljena na 0,2 bar, oko i manje iskusnog operatera može bez većih poteškoća očitavati i vrijednosti na razmaku od 0,1 bar. Nije zabranjeno niti preciznije očitavanje vrijednosti. Što je veća preciznost s kojom se očitava vrijednost tlaka, to će manja biti mjerna nesigurnost uzrokovana rezolucijom ispitivanog manometra.

Etalonski pretvornik tlaka imao je digitalan zaslon na kojem su bile ispisane vrijednosti tlaka. Korišteni pretvornik tlaka ima mogućnost pokazivanja iznosa tlaka u čak 21 različitoj mjernoj jedinici. Najpraktičnije je, zbog kasnijeg računa, koristiti se upravo onim jedinicama kojima mjerimo tlak i na ispitivanom mjerilu, kada nam se pruža ovakva mogućnost odlučivanja. Podjela njegove skale bila je na 0,001 bar. Prvenstveno služi za dovodenje tlaka radnog medija na određenu vrijednost nominalnog tlaka, no u slučaju da zbog nečega nismo u mogućnosti „pogoditi“ tlak u decimalu (a i kad jesmo) potrebno je zapisati vrijednost izmjenjenog tlaka upravo za slučaj istog tlaka kojeg očitavamo na umjeravanom mjerilu. Slika 17. prikazuje etalonski pretvornik tlaka u radu, te slikovito pokazuje koliko je pregledan način očitavanja vrijednosti tlaka.



Slika 19: Pretvornik tlaka u radu

Nakon što smo završili sa silaznom serijom i zapisali sve rezultate za sve mjerne točke, naš postupak umjeravanja završava. Potrebno je provjeriti da se radni medij u preši vratio na vrijednosti atmosferskog tlaka jer fluid pod visokim tlakom može biti opasan. To se, naravno, radi zbog sigurnosti djelatnika.

Dobivene rezultate zapisujemo na radne podloge, tj. umjerne listove, koji nam omogućuju bolju preglednost rezultata, lakše računanje veličina koje nas zanimaju poput odstupanja i histereze, ali isto tako, omogućuju da neka druga osoba, nakon određenog vremena može vidjeti rezultate mjerenja bez traženja dodatnih pojašnjenja same osobe ili osoblja koje je umjeravanje i provelo.

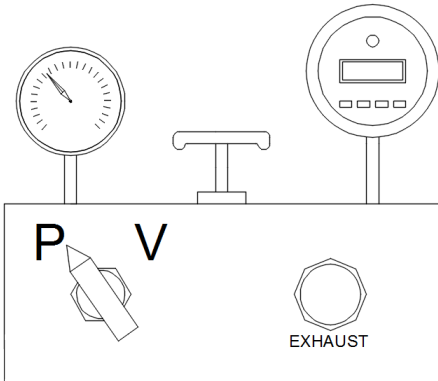
4.6. Podaci umjeravanja i prijedlog pripadajućih mjernih listova

U sklopu potrebe izrade ovoga rada, bilo je potrebno izraditi i mjerne listove za umjeravanje manometra na opisanoj mjernoj liniji. Također bila je potrebna i izrada shematskog prikaza same mjerne linije. I prijedlog pripadajućih mjernih listova i shematski prikaz mjerne linije uključeni su u ovaj rad kao prilog, na zadnjim stranicama.

Tablicom 10. prikazani su podaci umjeravanja opružnim manometrom na predloženom pripadajućem mjernom listu (cijeli pripadajući mjerni list se nalazi na kraju kao prilog završnom radu).

Ispunjeni su podaci o ispitivanom mjerilu, etalonu te uvjetima umjeravanja. Također bilježeni su rezultati mjerenja tlakova u ispitivanim točkama. Podaci o srednjoj vrijednosti, odstupanju i histerezi izračunati su kako je i prikazano na mjernim listovima.

Tablica 10. Primjer ispunjenog mjernog lista

PODACI O ISPITIVANOM MJERILU:					MJERNA LINIJA 		
Proizvođač: MAGNI							
Serijski broj: z-1610-1							
Tip mjerila: opružni manometar							
Mjerno područje: 0 -16 bar							
Jedinica tlaka: bar							
Podjela skale: 0,2							
Razlučivost: 0,1					UVJETI UMJERAVANJA: Radni medij: zrak Tlak okoline: (1016±1) hPa Temperatura okoline: (26±1) °C Relativna vlažnost zraka: (15±1) % Rh		
PODACI O ETALONU:							
Proizvođač: FLUKE							
Tip mjerila: pretvornik tlaka							
Mjerno područje: 0 - 20 bar							
Mjerna nesigurnost: 0,001							
PODACI DOBIVENI UMJERAVANJEM:							
Redni broj	Nazivni tlak p	Efektivni tlak p_e	Pokazivanje mjerila		Srednja vrijednost (M1+M2)/2 M_s	Odstupanje M_s-p_e Δp	Histereza M1-M2 h
			M1	M2			
1.	0	0,000	0,0	0,1	0,05	0,050	-0,1
2.	4	3,999	3,9	4,2	4,05	0,051	-0,3
3.	8	7,999	7,9	8,1	8,00	0,001	-0,2
4.	12	11,999	12,0	12,1	12,05	0,051	-0,1
5.	16	15,999	15,9	15,9	15,90	-0,099	0,0

5. REZULTATI MJERENJA

5.1. Proračun efektivnog tlaka na temelju rezultata umjeravanja s tlačnom vagom kao etalomom

Jednadžba za izračun efektivnog tlaka postavljena za idealni sklop glasi:

$$p_e = \frac{F}{A_e}$$

p_e - efektivan tlak generiran na sklopu

F - ukupna normalna sila koja djeluje na površinu

A_e - efektivna površina

Budući da ona vrijedi samo za slučaj idealnog sklopa, kojega u stvarnosti nikada nemamo, moramo je proširiti uzimajući u obzir bitne korekcije:

- korekcija efektivne površine
- korekcija ukupne sile
- korekcija zbog statičkog tlaka stupca fluida

1.) Korekcija efektivne površine vrši se proširivanjem brojnika početne jednadžbe sljedećom relacijom:

$$F = \sum_i m_i \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_i}\right) \cdot g + \Gamma \cdot c$$

m_i - masa i -tog utega

g - gravitacijsko ubrzanje sile teže za LPM

Član $\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_i}\right)$ predstavlja korekciju zbog uzgonskog djelovanja okolišnog zraka.

ρ_a - gustoća zraka okoline

ρ_i - gustoća i -tog utega

Član $\Gamma \cdot c$ predstavlja korekciju zbog uzgonskog djelovanja okolnog zraka.

Γ - opseg klipa

c - površinska napetost ulja

2.) Korekcija ukupne površine vrši se proširivanjem nazivnika početne jednadžbe sljedećom relacijom:

$$A_e = A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p) \cdot [1 + (\alpha_k + \alpha_c) \cdot (t - 20)]$$

A_0 - efektivna površina za uvijete atmosferskog tlaka i temperature 20°C.

Član $(1 + \lambda \cdot p)$ predstavlja linearnu ovisnost promjene efektivne površine ovisno o promjeni tlaka

λ - koeficijent elastične deformacije

p - nominalni tlak

Član $[1 + (\alpha_k + \alpha_c) \cdot (t - 20)]$ predstavlja korekciju zbog odstupanja od referentne temperature koja iznosi 20°C.

α_k - koeficijent temperaturnog širenja klipa

α_c - koeficijent temperaturnog širenja cilindra

t - temperatura sklopa za vrijeme ispitivanja

3.) Korekcija zbog statičkog tlaka stupca fluida vrši se zbrajanjem korekcijskog člana početnoj jednadžbi, pridruživanjem sljedeće relacije:

$$(\rho_f - \rho_a) \cdot g \cdot h$$

ρ_f - gustoća fluida (ulja)

ρ_a - gustoća zraka okoline

g - gravitacijsko ubrzanje sile teže za LPM

h - razlika visine instrumenata i dna klipa

Kada opisane relacije uvrstimo u početnu jednadžbu, dobijemo puno realniju relaciju za izračun efektivnog tlaka:

$$p_e = \frac{\sum_i m_i \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_i}\right) \cdot g + \Gamma \cdot c}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p) \cdot [1 + (\alpha_k + \alpha_c) \cdot (t - 20)]} + (\rho_f - \rho_a) \cdot g \cdot h$$

Većinu varijabli iz jednadžbe za izračun efektivnog tlaka možemo smatrati konstantnima. Zapravo, za svaku točku jedino se razlikuju iznosi mase utega, ili mase kombinacija utega koja se koristila za generiranje određenog tlaka, te vrijednosti nominalnih tlakova koji su vezani za svaku ispitivanu točku. Sve ostale nepoznanice smatramo konstantnima te su već od ranije poznate (primjerice za etalon), ili su izmjereni za vrijeme umjeravanja u Laboratoriju za procesna mjerenja (primjerice uvjeti umjeravanja).

Tablica 11. Podaci za etalon

Podaci za etalon	Oznaka	Iznos	Jedinica
Efektna površina	A_0	0,000049018918	m ²
Koeficijent distorzije	λ	-0.000000235	bar ⁻¹
Gustoća fluida	ρ_f	1,133	kg/m ³
Površinska napetost ulja	c	0,0312	N/m
Ubrzanje sile teže za LPM	g	9,806218	m/s ²
Opseg klipa	Γ	0,02481285	m
Koeficijenti temperaturnog širenja	α_k i α_c	0,000009	°C ⁻¹

Tablica 12. Popis konstantnih veličina

Podaci za etalon	Oznaka	Iznos	Jedinica
Gustoća zraka	ρ_a	1,17	kg/m ³
Temperatura sklopa	t	23	°C
Razlika visine između instrumenta i dna klipa	h	5,00	mm
Gustoća utega	ρ_i	7975	kg/m ³

Iz navedenih podataka jasno je da se generiranje određenog tlaka za neku radnu točku vršilo postavljanjem određene kombinacije utega. Potom se za neki drugi traženi tlak postavljala neka druga kombinacija utega.

Za potrebe generiranja tlakova u provedenom umjeravanju, korišteni su uzeti 4, 5, 6, 8 i 9, te njihove međusobne kombinacije. Kombinacije utega za svaku pojedinu točku, te podaci o atmosferskom i izračunatom efektivnom tlaku nalaze se u tablici 14.

Tablica 13. Popis utega

Oznaka utega	masa
1	100,00110 g
2	199,99820 g
3	200,00160 g
4	500,0031 g
5	1000,013 g
6	2000,026 g
7	2000,026 g
8	4500,024 g
9	5000,044 g

Tablica 14. Kombinacije utega i izračun efektivnog tlaka

Broj ispitnih točaka	Nazivni tlak p bar	Utezi									Atmosferski tlak p_a bar	Efektivan tlak p_e bar
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	0										1.000244	1.000098
2	2				4						2.000464	2.000171
3	4				4	5					4.000935	4.000350
4	6				4		6				6.001408	6.000531
5	8				4	5	6				8.001884	8.000713
6	10								8		10.002298	10.000836
7	12					5			8		12.002777	12.001023
8	14						6		8		14.003258	14.001211
9	16				4		6			9	16.003761	16.001422
10	18				4	5	6			9	18.004246	18.001615
11	20								8	9	20.004670	20.001747

5.2. Proračun mjerne nesigurnosti na temelju rezultata umjeravanja s pretvornikom tlaka kao etalom

5.2.1. Podaci dobiveni umjeravanjem

Provedbom umjeravanja opružnog manometra opisanog u poglavlju 4.5, dobiveni su sljedeći podaci prikazani u tablici 15.

Tablica 15. Podaci dobiveni umjeravanjem

Redni broj	Nazivni tlak p (bar)	Efektivni tlak p_e (bar)	Pokazivanje mjerila		Srednja vrijednost (M1+M2)/2 M_s (bar)	Odstupanje $M_s - p_e$ Δp (bar)	Histereza $M1 - M2$ h (bar)
			$M1$ (bar)	$M2$ (bar)			
1	0	0.000	0.0	0.1	0.05	0.050	-0.1
2	4	3.999	3.9	4.2	4.05	0.051	-0.3
3	8	7.999	7.9	8.1	8.00	0.001	-0.2
4	12	11.999	12.0	12.1	12.05	0.051	-0.1
5	16	15.999	15.9	15.9	15.90	-0.099	0.0

5.2.2. Identifikacija izvora mjernih nesigurnosti

Pri provedbi postupka umjeravanja identificirani su sljedeći izvori mjernih nesigurnosti:

- standardna nesigurnost etalona (u_e)
- nesigurnost rezolucije ispitivanog manometra (u_r)
- nesigurnost uslijed histereze (u_h)

5.2.3. Pojedine mjerne nesigurnosti

Standardnu nesigurnost etalona (u_e) ovom slučaju pretvornika tlaka računamo okretanjem jednadžbe:

$$U_e = k \cdot u_e$$

Budući da je za potrebe ovoga rada napravljeno umjeravanje pretvornika tlaka na tlačnoj vagi, dobiveni su podaci o proširenoj mjernoj nesigurnosti U_e . Isto tako, poznata je vrijednost faktora prekrivanja (k), koja iznosi 2.

Tablica 16. Standardna mjerna nesigurnost etalona

Broj ispitnih točaka	Nazivni tlak p (bar)	Proširena mjerna nesigurnost etalona U_e (bar)	Standardna mjerna nesigurnost etalona u_e bar
1	0	0.001	0.0005
2	4	0.001	0.0005
3	8	0.001	0.0005
4	12	0.001	0.0005
5	16	0.001	0.0005

Kako ispitivani manometar nije imao visoku razlučivost, morao uračunati nesigurnost zbog rezolucije ispitivanog manometra (u_r). Podjela skale manometra bila je 0.2 bar, ali se mogla očitati razlučivost od 0.1 bar. Zbog toga, u račun ulazimo s iznosom rezolucije ispitivanog manometra od $r=0.05$ bar za svaku točku. Mjernu nesigurnost zbog rezolucije računamo prema izrazu iz DKD-R 6-1 priručnika:

$$u_r = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{r}{2}\right)^2}$$

Nesigurnost uslijed histereze također moramo uzeti u obzir prilikom računanja standardne mjerne nesigurnosti. I nju možemo računati prema izrazu za nesigurnost danom u DKD-R 6-1 priručniku::

$$u_h = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2}$$

Gdje vrijednost označena s h odgovara vrijednosti izračunate histereze za pojedinu ispitivanu mjernu točku. Podatke o vrijednostima histereze za svaku mjernu točku možemo pronaći u tablici 15.

5.2.4. Složena standardna mjerna nesigurnost

Za svaku ispitivanu mjernu točku radi se izračun složene ili kombinirane standardne mjerne nesigurnosti opružnog manometra, prema formuli:

$$u_m = \sqrt{u_e^2 + u_r^2 + u_h^2}$$

Rezultati proračuna predstavljeni su u tablici 17.

Tablica 17. Standardna mjerna nesigurnost opružnog manometra

Broj ispitnih točaka	Nesigurnost etalona u_e (bar)	Nesigurnost zbog rezolucije u_r (bar)	Nesigurnost uslijed histereze u_h (bar)	Standardna mjerna nesigurnost manometra u_m (bar)
1	0.0005	0.0144	0.0289	0.0323
2	0.0005	0.0144	0.0866	0.0880
3	0.0005	0.0144	0.0577	0.0595
4	0.0005	0.0144	0.0289	0.0323
5	0.0005	0.0144	0.0000	0.0144

Iz proračuna se može zaključiti da u točkama gdje je histereza veća, a to su točke 2 i 3, značajan, tj. glavni dio standardne mjerne nesigurnosti dolazi upravo zbog nesigurnosti uslijed histereze. Također, iz točke 5, gdje nemamo nesigurnost uslijed histereze, možemo zaključiti da nesigurnost etalona gotovo pa ni ne utječe na standardnu mjernu nesigurnost ispitivanog manometra.

5.2.5. Proširena mjerna nesigurnost

Proširenu mjernu nesigurnost opružnog manometra (U_m) računamo iz izraza:

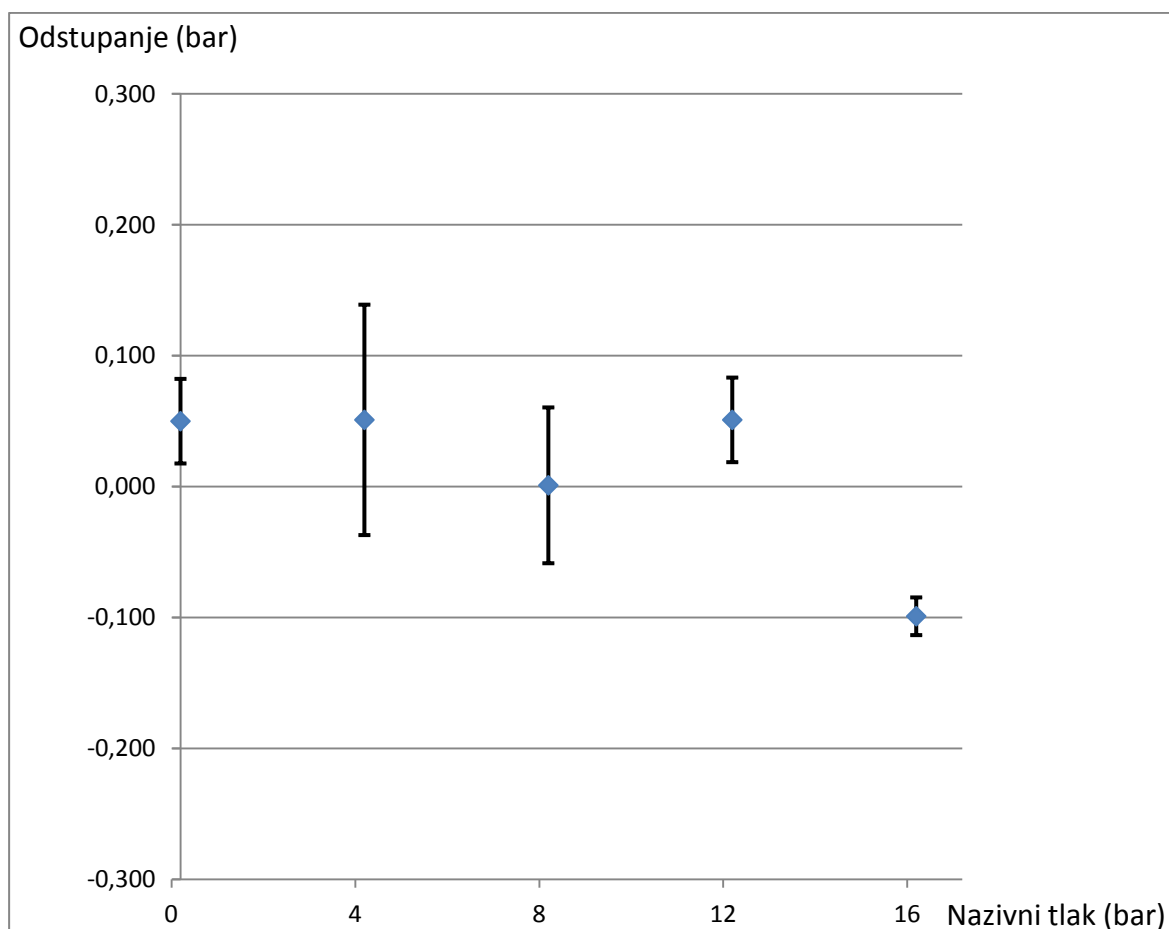
$$U_m = k \cdot u_m$$

Faktor prekrivanja (k) je 2. Rezultati su dani u tablici 18.

Tablica 18. Proširena mjerna nesigurnost opružnog manometra

Broj ispitnih točaka	Nazivni tlak p (bar)	Odstupanje p_e (bar)	Standardna mjerna nesigurnost manometra u_m (bar)	Proširena mjerna nesigurnost U_m (bar)
1	0	0.050	0.0323	0,0626
2	4	0.051	0.0880	0,1760
3	8	0.001	0.0595	0,1190
4	12	0.051	0.0323	0.0646
5	16	-0.099	0.0144	0.0288

Rezultati su slikovito prikazani dijagramom tlaka i proširene mjerne nesigurnosti na slici 20.



Slika 20: Dijagram tlaka i mjerne nesigurnosti opružnog manometra

6. ZAKLJUČAK

Prezentirane su i detaljno opisane metode umjeravanja kako bi na lak i razumljiv način studenti, koji će se susretati s tematikom umjeravanja i mjeriteljstva općenito, lakše i brže savladali izazove koje su stavljeni pred njih. Također, postupci umjeravanja koje će se eventualno koristiti na studentskim vježbama, s istom ili sličnom mjernom linijom, ovdje su potanko opisani, a dane su i preporuke za obavljanje istih.

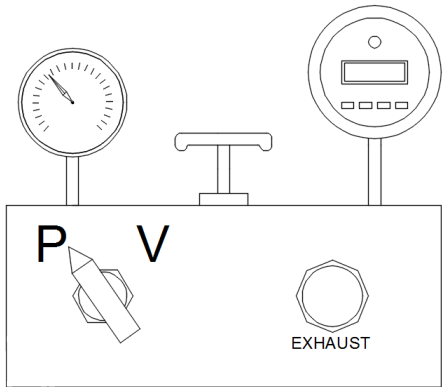
Iz rezultata mjerenja, tj. umjeravanja jasno se može iščitati razlika u kvaliteti između dva mjerila tlaka, jednog skupljeg i kvalitetnijeg pretvornika tlaka, te drugog, opružnog manometara. To najbolje pokazuju dijagrami nesigurnosti za jedan i drugi instrument gdje je jasno vidljivo da sa, u ovom radu korištenim, pretvornikom tlaka možemo imati pouzdanija, a samim time i preciznija mjerenja, nego s opružnim manometrom koji je korišten u ispitivanjima, prilikom izrade ovoga rada, jer su nesigurnosti na koje možemo i moramo računati puno veće. Naravno, razlika u cijeni je ta koja diktira tempo razvoja današnjih mjerila u svim područjima industrije i tehnologije, pa tako i kod umjeravanja.

LITERATURA

- [1] „Hrvatska enciklopedija“, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, www.enciklopedija.hr
- [2] FSB-LPM, Podloge za vježbe iz kolegija Toplinska i procesna mjerenja
- [3] Antun Galović.: Termodinamika 1, Zagreb, 2011.
- [4] Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum, NPL, London, 1998.
- [5] DKD-R 6-1 Calibration of Pressure Gauges, 2014.
- [6] EURAMET/cg-17/v.01, Guidelines on the Calibration of Electromechanical Manometers, 2007.
- [7] Fluke Calibration, eu.flukecal.com
- [8] Potvrda o umjeravanju br. 2-0005/17-01

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Potvrda o umjeravanju br. 2-0005/17-01
- III. Prijedlog pripadajućih mjernih listova

LPM-FSB				MJERNI LIST			
PODACI O ISPITIVANOM MJERILU:					MJERNA LINIJA 		
Proizvođač:							
Serijski broj:							
Tip mjerila:							
Mjerno područje:							
Jedinica tlaka:							
Podjela skale:							
Razlučivost:							
PODACI O ETALONU:					UVJETI UMJERAVANJA:		
Proizvođač:					Radni medij:		
Tip mjerila:					Tlak okoline:		
Mjerno područje:					Temperatura okoline:		
Mjerna nesigurnost:					Relativna vlažnost zraka:		
PODACI DOBIVENI UMJERAVANJEM:							
Redni broj	Nazivni tlak P	Efektivni tlak P_e	Pokazivanje mjerila		Srednja vrijednost (M1+M2)/2 M_s	Odstupanje M_s-P_e Δp	Histereza M1-M2 h
			M1	M2			
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							

UMJERAVAO:

DATUM:

POTVRDA O UMJERAVANJU br.

2-0005/17-01

Certificate of Calibration No.

Mjerilo <i>Object</i>	Pretvornik tlaka s indikacijom
Proizvođač <i>Manufacturer</i>	FLUKE
Tip <i>Type</i>	2700G
Serijski broj <i>Serial number</i>	3310079
Podnositelj zahtijeva <i>Customer</i>	FSB-LPM
Broj radnog lista <i>Work order No.</i>	LPM-03227-2017
Broj stranica potvrde <i>Number of pages of the certificate</i>	2
Umjerna oznaka <i>Calibration mark</i>	2-0005/17-01
Datum umjeravanja <i>Date of calibration</i>	18.1.2017.

Mjerne nesigurnosti navedene u ovom dokumentu određene su sukladno ISO/IEC Guide 98-3 i EA-4/02. Mjerne nesigurnosti su procijenjene kao proširene nesigurnosti dobivene množenjem standardne nesigurnosti s faktorom pokrivanja k , koji odgovara razini povjerenja od oko 95 %. Uobičajeno, faktor k iznosi 2. Ova potvrda ne može se obnoviti djelomično, osim uz pismeno odobrenje Laboratorija koji ju je izdao. Napomena: Ovoj potvrdi pridružena je naljepnica na kojoj se broj 4 odnosi na laboratorij HMI/FSB-LPM sukladno organizacijskoj shemi HMI-a.

The measurement uncertainties stated in this document have been determined according to the ISO/IEC Guide 98-3 and EA-4/02. Usually, they have been estimated as expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor k corresponding to a confidence level of about 95 %. Normally, this factor k is 2.

This certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of the issuing Laboratory.

Note: This certificate is associated with a label on which the number 4 refers to the laboratory HMI/FSB-LPM according to the HMI organizational chart.

Odgovorna osoba
Authorized person

Voditelj umjernog laboratorija
Head of the Calibration Laboratory

Joško Zelko

Prof. dr. sc. Davor Zvizdić

1. Podaci o umjeravanom mjerilu tlaka:

Vrsta mjerila:	Pretvornik tlaka
Mjerno područje:	0 do 20 bar
Razred točnosti:	0.020 %
Dopušteno odstupanje:	0.004 bar
Podjela skale:	0.001 bar
Jedinica tlaka:	bar

2. Podaci o etalonu:

Naziv etalona:	Tlačna vaga "Delt"
Interna oznaka:	TLVAG-09
Nesigurnost etalona:	$0.5 \times 10^{-4} \times p$
Slijedivost:	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

3. Umjerna procedura:

Instrument je umjeren pomoću etalonskih mjernih sustava Laboratorija za procesna mjerenja. Korištena je interna procedura umjeravanja metodom usporedbe CPTL-02 temeljena na DKD-R6-1 (Tip A) proceduri.

4. Uvjeti umjeravanja:

Temperatura okoline:	(24±1) °C	Tlačni medij:	dušik
Tlak okoline:	(1017±1) mbar	Pozicija ispitivanog mjerila:	horizontalna
Relativna vlažnost okoline:	(30±3) %rv		

5. Rezultati umjeravanja (Pod gore navedenim uvjetima):

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona p_e bar	Pokazivanje mjerila				Srednja vrijednost \bar{M} bar	Odstupanje $M - p_e$ bar	Ponovljivost b bar	Histereza h bar	Nesigurnost umjeravanja U bar
		Uzlazno bar	Silazno bar	Uzlazno bar	Silazno bar					
1	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.0003	0.000	0.001	0.001	0.001
2	2.000	1.999	2.000	2.000	2.000	1.9998	0.000	0.001	0.000	0.001
3	4.000	4.000	4.001	4.000	4.001	4.0005	0.001	0.000	0.001	0.001
4	6.000	6.001	6.001	6.000	6.001	6.0008	0.001	0.001	0.001	0.001
5	8.001	8.001	8.002	8.001	8.002	8.0015	0.001	0.000	0.001	0.001
6	10.001	10.001	10.002	10.001	10.002	10.0015	0.001	0.000	0.001	0.001
7	12.001	12.002	12.002	12.001	12.002	12.0018	0.001	0.001	0.001	0.001
8	14.001	14.002	14.002	14.001	14.001	14.0015	0.001	0.001	0.000	0.001
9	16.001	16.001	16.002	16.001	16.001	16.0013	0.000	0.001	0.000	0.001
10	18.0010	18.001	18.002	18.001	18.001	18.0013	0.000	0.001	0.000	0.002
11	20.002	20.002	20.002	20.001	20.001	20.0015	0.000	0.001	0.000	0.002

6. Mjerna nesigurnost:

Nesigurnost navedena u tablici je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju ($k=2$), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95%.

7. Označavanje instrumenta:

Umjerna oznaka naljepljena je na kućište instrumenta.